

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Trabajo Fin de Grado

**Planificación en entornos urbanos y rurales de una Red de Cuarta  
Generación Móvil LTE en la Región de Murcia**



AUTOR: Fidel Agustín Cánovas  
DIRECTOR: Juan Pascual García  
Septiembre / 2015

<b>Autor</b>	Fidel Agustín Cánovas
<b>E-mail del autor</b>	fidel.agustin@gmail.com
<b>Director</b>	Juan Pascual García
<b>E-mail del director</b>	juan.pascual@upct.es
<b>Título del TFG</b>	Planificación en entornos urbanos y rurales de una Red de Cuarta Generación Móvil LTE en la Región de Murcia.
<b>Resumen</b>	<p>La tecnología móvil LTE de cuarta generación (4G) es el sistema de comunicaciones más avanzado en la actualidad. En España se han desplegado diversas redes de LTE, especialmente en entornos urbanos. La planificación de la red LTE es fundamental para que los servicios ofrecidos por dicha red alcancen una calidad óptima.</p> <p>En el presente proyecto se llevará a cabo la planificación de una red LTE en un entorno urbano y en un entorno rural de la Región de Murcia.</p> <p>La planificación de la red LTE será completa. En primer lugar, se calcularán el número de estaciones base (eNodos B) necesarios para satisfacer las necesidades de tráfico ofrecido por los usuarios. Para realizar este cálculo se llevará a cabo un estudio del tráfico que puede cursar cada tipo de eNodo B y del tráfico medio que demanda un usuario tanto en un entorno urbano como rural. Una vez conocido el número de eNodos B, estos se ubicarán en posiciones estratégicas para que la cobertura del sistema cubra toda el área de servicio. Este último punto contará con un estudio profundo de la cobertura de los eNodos B necesarios para brindar los servicios deseados por los usuarios. En dicho estudio se utilizarán diversos modelos de propagación adecuados para el entorno urbano y rural propuestos.</p>
<b>Titulación</b>	Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación
<b>Departamento</b>	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
<b>Fecha de presentación</b>	Septiembre 2015



## Reconocimientos

A mi profesor y director de proyecto, Juan Pascual García, por su inestimable dedicación, ayuda y consejo durante todo el desarrollo del presente proyecto.

Al profesor José Luis Gómez Tornero por haber reflejado de manera tan profesional su pasión por la enseñanza, así como por servirme de modelo en caso de que en un futuro pueda dedicarme a la docencia.

## **Dedicatoria**

Especialmente a mis padres, que sin su esfuerzo, apoyo y enseñanza nada de esto hubiera sido posible. Su paciencia y cariño han sido gran parte del motor que me ha movido hasta aquí.

A mis abuelos, a mis padrinos y a mis primos, Cristina y Javier, que siempre me han transmitido su energía y motivación para conseguir mis propósitos.

A mis amigos, tanto externos como los conocidos en mi periplo por la UPCT, porque sus consejos y símbolos de compañerismo y afecto son de alabar.

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>25</b>
<b>2. ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA LTE.....</b>	<b>28</b>
<b>2.1. 3GPP .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2. INTRODUCCIÓN A LTE .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3. ARQUITECTURA DE RED.....</b>	<b>29</b>
2.3.1. TERMINAL DE USUARIO (UE) .....	30
2.3.2. RED DE ACCESO RADIO UMTS EVOLUCIONADA (E-UTRAN).....	31
2.3.3. NÚCLEO EVOLUCIONADO DE PAQUETES (EPC) .....	32
2.3.4. CAPA DE CONECTIVIDAD DE SERVICIOS.....	33
<b>2.4. CAPA FÍSICA DE LTE: INTERFAZ RADIO .....</b>	<b>35</b>
2.4.1. TÉCNICAS DE ACCESO AL MEDIO.....	35
2.4.1.1. ENLACE DESCENDENTE: OFDMA.....	35
2.4.1.2. ENLACE ASCENDENTE: SC-FDMA .....	37
2.4.2. MODOS DE DUPLEXADO.....	38
2.4.3. MODULACIONES.....	40
2.4.4. ESCALABILIDAD DE ANCHO DE BANDA .....	41
2.4.5. TÉCNICA MIMO.....	41
<b>3. GRADO PENETRACION LTE EN ESPAÑA Y REGION DE MURCIA. BANDAS LICENCIADAS EN ESPAÑA .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1. LTE EN ESPAÑA .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2. LTE EN LA REGIÓN DE MURCIA .....</b>	<b>45</b>
<b>4. ESTUDIO DEL TRÁFICO DEMANDADO POR LOS USUARIOS DEL SISTEMA LTE.....</b>	<b>49</b>
<b>5. ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE UN eNODO-B TÍPICO DE ENTORNO RURAL Y URBANO .....</b>	<b>54</b>
<b>6. BALANCE DE ENLACES .....</b>	<b>64</b>
<b>7. CÁLCULO DEL NÚMERO DE eNODOS-B EN LOS ENTORNOS ESTUDIADOS</b>	<b>69</b>
<b>7.1. ENTORNO URBANO.....</b>	<b>70</b>
7.1.1. DIMENSIONAMIENTO DADO POR TRÁFICO .....	70
7.1.1.1. DIMENSIONAMIENTO BASADO EN VOLUMEN DE TRÁFICO .....	70
7.1.1.2. DIMENSIONAMIENTO BASADO EN TASA DE DATOS .....	82

7.1.2. DIMENSIONAMIENTO DADO SEGÚN PÉRDIDAS MÁXIMAS.....	95
<b>7.2. ENTORNO RURAL.....</b>	<b>101</b>
7.2.1. DIMENSIONAMIENTO DADO POR TRÁFICO.....	101
7.2.1.1. DIMENSIONAMIENTO BASADO EN VOLUMEN DE TRÁFICO.....	101
7.2.1.2. DIMENSIONAMIENTO BASADO EN TASA DE DATOS.....	112
7.2.2. DIMENSIONAMIENTO DADO SEGÚN PÉRDIDAS MÁXIMAS.....	123
<b>8. ESTUDIO DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPLEADOS.....</b>	<b>126</b>
<b>8.1. ENTORNO URBANO.....</b>	<b>126</b>
8.1.1. MODELO COST-231 O WALFISCH-IKEGAMI.....	126
8.1.2. MODELO HAR-XIA-BERTONI.....	129
<b>8.2. ENTORNO RURAL.....</b>	<b>131</b>
8.2.1. MODELO UIT R-526.....	132
<b>9. ESTUDIO DE LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE LOS ENODOS B EN LOS ENTORNOS ESTUDIADOS.....</b>	<b>134</b>
<b>9.1. ENTORNO URBANO.....</b>	<b>134</b>
9.1.1. CASO 1 – QPSK, MIMO 2 x 2, CQI =6.....	135
9.1.1.1. UBICACIÓN BASADA EN EL USO DEL MODELO DE PROPAGACIÓN COST-231.....	136
9.1.1.2. UBICACIÓN BASADA EN USO DE MODELO DE PROPAGACIÓN HAR-XIA-BERTONI.....	159
9.1.2. CASO 2 – 16-QAM, MIMO 2 x 2, CQI = 8.....	185
9.1.2.1. UBICACIÓN BASADA EN USO DE MODELO DE PROPAGACIÓN COST-231.....	186
9.1.2.2. UBICACIÓN BASADA EN USO DE MODELO DE PROPAGACIÓN HAR-XIA-BERTONI.....	201
9.1.3. CASO 3 – 64-QAM, SIN MIMO, CQI = 13.....	216
9.1.3.1. UBICACIÓN BASADA EN USO DE MODELO DE PROPAGACIÓN COST-231.....	217
9.1.3.2. UBICACIÓN BASADA EN USO DE MODELO DE PROPAGACIÓN HAR-XIA-BERTONI.....	229
<b>9.2. ENTORNO RURAL.....</b>	<b>241</b>
9.2.1. UBICACIÓN BASADA EN USO DE MODELO DE PROPAGACIÓN UIT R-526.....	242
<b>10. CONCLUSIONES.....</b>	<b>243</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>245</b>

## Índice de figuras

Figura 1.1. Logo LTE.....	25
Figura 1.2. Principales objetivos de LTE [1] .....	25
Figura 1.3. Número de operadores móviles con servicio de voz HD [3].....	26
Figura 1.4. Comparativa de uso de dispositivos LTE [4].....	27
Figura 2.1. Velocidades y anchos de banda de las diferentes <i>releases</i> presentadas por la 3GPP [6].....	28
Figura 2.2. Mapa mundial de situación de la tecnología LTE [7].....	29
Figura 2.3. Arquitectura del sistema considerando únicamente la red de LTE [1] .....	30
Figura 2.4. Interconexiones en la red E-UTRAN [9].....	32
Figura 2.5. Estructura del sistema EPS [10] .....	33
Figura 2.6. Conexiones con el IMS [1].....	34
Figura 2.7. Visualización de la ortogonalidad entre subportadoras [1] .....	35
Figura 2.8. Estructura de trama en el enlace descendente, considerando CP largo [11].....	36
Figura 2.9. Comparación en la asignación de subportadoras entre OFDM y OFDMA [5] .....	36
Figura 2.10. Estructura de trama en el enlace ascendente [11].....	37
Figura 2.11. Comparación de transmisión mediante OFDMA y SC-FDMA [5] .....	38
Figura 3.1. Comparación de la irrupción del Smartphone en EU5 [13] .....	42
Figura 3.2. Calendario de despliegue de LTE en España [15].....	43
Figura 3.3. Ubicación de todos los eNodos-B de 800 MHz desplegados por todas las operadoras en España [18].....	45
Figura 3.4. Número de eNodosB en cada Comunidad Autónoma. [19] .....	46
Figura 3.5. Cobertura LTE en la Región de Murcia proporcionada por la compañía Vodafone [20].....	47
Figura 3.6. Cobertura LTE en la Región de Murcia proporcionada por la compañía Movistar [21].....	47
Figura 3.7. Cobertura LTE en la Región de Murcia proporcionada por la compañía Orange [22].....	48

Figura 4.1. Configuración en Verizon para el caso A [23] .....	50
Figura 4.2. Configuración en Verizon para el caso B [23] .....	51
Figura 4.3. Configuración en Vodafone para el caso C [24] .....	52
Figura 7.1. Cuotas de mercado de 2013 según la CNMC [26] .....	69
Figura 7.2. Procedimiento seguido para dimensionamiento basado en volumen de tráfico [1] .....	70
Figura 7.3. Procedimiento seguido para dimensionamiento basado en tasa de datos [1] .....	83
Figura 7.4. Parámetros de transmisión definidos en RadioGIS .....	96
Figura 7.5. Parámetros de recepción definidos en RadioGIS .....	96
Figura 7.6. Parámetros de la estación base definidos en RadioGIS .....	97
Figura 7.7. Parámetros del terminal móvil definidos en RadioGIS .....	98
Figura 7.8. Área cubierta en entorno urbano por un emplazamiento según el estudio de pérdidas máximas .....	99
Figura 7.9. Superficie de estudio en el entorno urbano, proporcionada por Google Maps ...	100
Figura 7.10. Zona rural relativa a Fortuna que consideramos en RadioGIS .....	123
Figura 7.11. Área cubierta en entorno rural por un emplazamiento según estudio de pérdidas máximas .....	124
Figura 7.12. Superficie de estudio en el entorno rural, proporcionada por Google Maps .....	125
Figura 8.1. Entorno de propagación, elementos y contribuciones en el modelo de Walfisch-Bertoni [28] .....	127
Figura 8.2. Ángulo $\varphi$ en el modelo de Walfisch-Ikegami (COST-231) [28] .....	128
Figura 8.3. Mapa del entorno urbano con varios receptores en los que no existe visión directa [28] .....	130
Figura 8.4. Ejemplo del modelo UIT R-526 [28] .....	132
Figura 9.1. Cobertura de primer sector ( $0^\circ$ ) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	138
Figura 9.2. Cobertura de segundo sector ( $120^\circ$ ) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	138
Figura 9.3. Cobertura de tercer sector ( $240^\circ$ ) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	139
Figura 9.4. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 1 en entorno	

urbano, con COST-231 .....	139
Figura 9.5. Cobertura de primer sector (0°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	140
Figura 9.6. Cobertura de segundo sector (120°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	140
Figura 9.7. Cobertura de tercer sector (240°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	141
Figura 9.8. Cobertura total proporcionada por segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	141
Figura 9.9. Cobertura de primer sector (0°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	142
Figura 9.10. Cobertura de segundo sector (120°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	142
Figura 9.11. Cobertura de tercer sector (240°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	143
Figura 9.12. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	143
Figura 9.13. Cobertura de primer sector (0°) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	144
Figura 9.14. Cobertura de segundo sector (120°) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	144
Figura 9.15. Cobertura de tercer sector (240°) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	145
Figura 9.16. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	145
Figura 9.17. Cobertura de primer sector (0°) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	146
Figura 9.18. Cobertura de segundo sector (120°) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	146
Figura 9.19. Cobertura de tercer sector (240°) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	147
Figura 9.20. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	147
Figura 9.21. Cobertura de primer sector (0°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	148

Figura 9.22. Cobertura de segundo sector (120°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	148
Figura 9.23. Cobertura de tercer sector (240°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	149
Figura 9.24. Cobertura total proporcionada por sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	149
Figura 9.25. Cobertura de primer sector (0°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	150
Figura 9.26. Cobertura de segundo sector (120°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	150
Figura 9.27. Cobertura de tercer sector (240°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	151
Figura 9.28. Cobertura total proporcionada por séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	151
Figura 9.29. Cobertura de primer sector (0°) de octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	152
Figura 9.30. Cobertura de segundo sector (120°) de octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	152
Figura 9.31. Cobertura de tercer sector (240°) de octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	153
Figura 9.32. Cobertura total proporcionada por octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	153
Figura 9.33. Cobertura de primer sector (0°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	154
Figura 9.34. Cobertura de segundo sector (120°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	154
Figura 9.35. Cobertura de tercer sector (240°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	155
Figura 9.36. Cobertura total proporcionada por noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	155
Figura 9.37. Cobertura de primer sector (0°) de décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	156
Figura 9.38. Cobertura de segundo sector (120°) de décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	156
Figura 9.39. Cobertura de tercer sector (240°) de décimo emplazamiento para caso 1 en	



entorno urbano, con COST-231 .....	157
Figura 9.40. Cobertura total proporcionada por décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	157
Figura 9.41. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	158
Figura 9.42. Mapa de mejor servidor en el sistema correspondiente al caso 1 en entorno urbano, con COST-231 .....	159
Figura 9.43. Cobertura de primer sector (0°) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	162
Figura 9.44. Cobertura de segundo sector (120°) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	162
Figura 9.45. Cobertura de tercer sector (240°) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	163
Figura 9.46. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	163
Figura 9.47. Cobertura de primer sector (0°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	164
Figura 9.48. Cobertura de segundo sector (120°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	165
Figura 9.49. Cobertura de tercer sector (240°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	165
Figura 9.50. Cobertura total proporcionada por segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	166
Figura 9.51. Cobertura de primer sector (0°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	166
Figura 9.52. Cobertura de segundo sector (120°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	167
Figura 9.53. Cobertura de tercer sector (240°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	167
Figura 9.54. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	168
Figura 9.55. Cobertura de primer sector (0°) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	169
Figura 9.56. Cobertura de segundo sector (120°) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	169

Figura 9.57. Cobertura de tercer sector (240°) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	170
Figura 9.58. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	170
Figura 9.59. Cobertura de primer sector (0°) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	171
Figura 9.60. Cobertura de segundo sector (120°) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	172
Figura 9.61. Cobertura de tercer sector (240°) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	172
Figura 9.62. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	173
Figura 9.63. Cobertura de primer sector (0°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	173
Figura 9.64. Cobertura de segundo sector (120°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	174
Figura 9.65. Cobertura de tercer sector (240°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	174
Figura 9.66. Cobertura total proporcionada por sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	175
Figura 9.67. Cobertura de primer sector (0°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	176
Figura 9.68. Cobertura de segundo sector (120°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	176
Figura 9.69. Cobertura de tercer sector (240°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	177
Figura 9.70. Cobertura total proporcionada por séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	177
Figura 9.71. Cobertura de primer sector (0°) de octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	178
Figura 9.72. Cobertura de segundo sector (120°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	178
Figura 9.73. Cobertura de tercer sector (240°) de octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	179
Figura 9.74. Cobertura total proporcionada por octavo emplazamiento para caso 1 en entorno	

urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	179
Figura 9.75. Cobertura de primer sector (340°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	180
Figura 9.76. Cobertura de segundo sector (100°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	180
Figura 9.77. Cobertura de tercer sector (220°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	181
Figura 9.78. Cobertura total proporcionada por noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	181
Figura 9.79. Cobertura de primer sector (40°) de décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	182
Figura 9.80. Cobertura de segundo sector (160°) de décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	182
Figura 9.81. Cobertura de tercer sector (280°) de décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	183
Figura 9.82. Cobertura total proporcionada por décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	183
Figura 9.83. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	184
Figura 9.84. Mapa de mejor servidor en el sistema correspondiente al caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	185
Figura 9.85. Cobertura de primer sector (0°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	187
Figura 9.86. Cobertura de segundo sector (120°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	188
Figura 9.87. Cobertura de tercer sector (240°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	188
Figura 9.88. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	189
Figura 9.89. Cobertura de primer sector (0°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	189
Figura 9.90. Cobertura de segundo sector (120°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	190
Figura 9.91. Cobertura de tercer sector (240°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	190

Figura 9.92. Cobertura total proporcionada por segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	191
Figura 9.93. Cobertura de primer sector (0°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	191
Figura 9.94. Cobertura de segundo sector (120°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	192
Figura 9.95. Cobertura de tercer sector (240°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	192
Figura 9.96. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	193
Figura 9.97. Cobertura de primer sector (0°) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	193
Figura 9.98. Cobertura de segundo sector (120°) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	194
Figura 9.99. Cobertura de tercer sector (240°) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	194
Figura 9.100. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	195
Figura 9.101. Cobertura de primer sector (0°) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	195
Figura 9.102. Cobertura de segundo sector (120°) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	196
Figura 9.103. Cobertura de tercer sector (240°) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	196
Figura 9.104. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	197
Figura 9.105. Cobertura de primer sector (50°) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	198
Figura 9.106. Cobertura de segundo sector (170°) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	198
Figura 9.107. Cobertura de tercer sector (290°) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	199
Figura 9.108. Cobertura total proporcionada por sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	199
Figura 9.109. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 2 en	

entorno urbano, con COST-231 .....	200
Figura 9.110. Mapa de mejor servidor en el sistema correspondiente al caso 2 en entorno urbano, con COST-231 .....	201
Figura 9.111. Cobertura de primer sector (0°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	203
Figura 9.112. Cobertura de segundo sector (120°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	203
Figura 9.113. Cobertura de tercer sector (240°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	204
Figura 9.114. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	204
Figura 9.115. Cobertura de primer sector (0°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	205
Figura 9.116. Cobertura de segundo sector (120°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	205
Figura 9.117. Cobertura de tercer sector (240°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	206
Figura 9.118. Cobertura total proporcionada por segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	206
Figura 9.119. Cobertura de primer sector (0°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	207
Figura 9.120. Cobertura de segundo sector (120°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	207
Figura 9.121. Cobertura de tercer sector (240°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	208
Figura 9.122. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	208
Figura 9.123. Cobertura de primer sector (0°) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	209
Figura 9.124. Cobertura de segundo sector (120°) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	209
Figura 9.125. Cobertura de tercer sector (240°) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	210
Figura 9.126. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	210

Figura 9.127. Cobertura de primer sector ( $0^{\circ}$ ) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	211
Figura 9.128. Cobertura de segundo sector ( $120^{\circ}$ ) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	211
Figura 9.129. Cobertura de tercer sector ( $240^{\circ}$ ) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	212
Figura 9.130. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	212
Figura 9.131. Cobertura de primer sector ( $70^{\circ}$ ) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	213
Figura 9.132. Cobertura de segundo sector ( $190^{\circ}$ ) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	214
Figura 9.133. Cobertura de tercer sector ( $310^{\circ}$ ) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	214
Figura 9.134. Cobertura total proporcionada por sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	215
Figura 9.135. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	215
Figura 9.136. Mapa de mejor servidor en el sistema correspondiente al caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	216
Figura 9.137. Cobertura de primer sector ( $0^{\circ}$ ) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	218
Figura 9.138. Cobertura de segundo sector ( $120^{\circ}$ ) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	218
Figura 9.139. Cobertura de tercer sector ( $240^{\circ}$ ) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	219
Figura 9.140. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	219
Figura 9.141. Cobertura de primer sector ( $0^{\circ}$ ) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	220
Figura 9.142. Cobertura de segundo sector ( $120^{\circ}$ ) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	220
Figura 9.143. Cobertura de tercer sector ( $240^{\circ}$ ) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	221
Figura 9.145. Cobertura de primer sector ( $0^{\circ}$ ) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno	

urbano, con COST-231 .....	222
Figura 9.146. Cobertura de segundo sector (120°) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	222
Figura 9.147. Cobertura de tercer sector (240°) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	223
Figura 9.148. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	223
Figura 9.149. Cobertura de primer sector (0°) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	224
Figura 9.150. Cobertura de segundo sector (120°) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	224
Figura 9.151. Cobertura de tercer sector (240°) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	225
Figura 9.152. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	225
Figura 9.153. Cobertura de primer sector (0°) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	226
Figura 9.154. Cobertura de segundo sector (120°) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	226
Figura 9.155. Cobertura de tercer sector (240°) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	227
Figura 9.156. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	227
Figura 9.157. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	228
Figura 9.158. Mapa de mejor servidor en el sistema correspondiente al caso 3 en entorno urbano, con COST-231 .....	228
Figura 9.159. Cobertura de primer sector (0°) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	230
Figura 9.160. Cobertura de segundo sector (120°) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	230
Figura 9.161. Cobertura de tercer sector (240°) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	231
Figura 9.162. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	231

Figura 9.163. Cobertura de primer sector ( $0^{\circ}$ ) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	232
Figura 9.164. Cobertura de segundo sector ( $120^{\circ}$ ) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	232
Figura 9.165. Cobertura de tercer sector ( $240^{\circ}$ ) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	233
Figura 9.166. Cobertura total proporcionada por segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	233
Figura 9.167. Cobertura de primer sector ( $0^{\circ}$ ) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	234
Figura 9.168. Cobertura de segundo sector ( $120^{\circ}$ ) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	234
Figura 9.169. Cobertura de tercer sector ( $240^{\circ}$ ) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	235
Figura 9.170. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	235
Figura 9.171. Cobertura de primer sector ( $0^{\circ}$ ) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	236
Figura 9.172. Cobertura de segundo sector ( $120^{\circ}$ ) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	236
Figura 9.173. Cobertura de tercer sector ( $240^{\circ}$ ) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	237
Figura 9.174. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	237
Figura 9.175. Cobertura de primer sector ( $0^{\circ}$ ) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	238
Figura 9.176. Cobertura de segundo sector ( $120^{\circ}$ ) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	238
Figura 9.177. Cobertura de tercer sector ( $240^{\circ}$ ) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	239
Figura 9.178. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	239
Figura 9.179. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	240
Figura 9.180. Mapa de mejor servidor en el sistema correspondiente al caso 3 en entorno	



urbano, con Har-Xia-Bertoni .....	240
Figura 9.181. Cobertura total proporcionada por el sistema en entorno rural, con UIT R-526 .....	242

## Índice de tablas

Tabla 2.1. Categorías de terminales en LTE [8].....	31
Tabla 2.2. Bandas de frecuencia en UMTS y LTE para FDD [11] .....	39
Tabla 2.3. Bandas de frecuencia en UMTS y LTE para TDD [11] .....	39
Tabla 2.4. Tabla de CQI [12].....	40
Tabla 2.5. Número de bloques de recurso en función del ancho de banda [1] .....	41
Tabla 3.1. Frecuencias destinadas a explotación de LTE en España [14].....	43
Tabla 4.1. Volumen de datos requerido según la configuración dispuesta para el caso A [23] 49	
Tabla 4.2. Volumen de datos requerido según la configuración dispuesta para el caso B [23] 50	
Tabla 4.3. Volumen de datos requerido según la configuración dispuesta para el caso C [24] 52	
Tabla 5.1. Comparación de BW total frente al útil. ....	55
Tabla 5.2. Cantidad de bloques de recurso asignados a cada BW.....	56
Tabla 5.3. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de QPSK, sin MIMO. ....	58
Tabla 5.4. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de QPSK, con MIMO 2 x 2. ....	59
Tabla 5.5. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de QPSK, con MIMO 4 x 4. ....	59
Tabla 5.6. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 16-QAM, sin MIMO.....	60
Tabla 5.7. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 16-QAM, con MIMO 2 x 2....	61
Tabla 5.8. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 16-QAM, con MIMO 4 x 4....	61
Tabla 5.9. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 64-QAM, sin MIMO.....	62
Tabla 5.10. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 64-QAM, con MIMO 2 x 2..	63
Tabla 5.11. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 64-QAM, con MIMO 4 x 4..	63
Tabla 6.1. Balance de enlace ascendente para el caso de BW = 360 kHz [1].....	64
Tabla 6.2. Balance de enlace descendente para el caso de BW = 10 MHz [1]. ....	66
Tabla 6.3. Balance de enlace ascendente para el caso de BW = 10 MHz [1]. ....	67
Tabla 7.1. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK sin MIMO .....	74
Tabla 7.2. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de	

tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 2 x 2.....75

Tabla 7.3. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 4 x 4.....76

Tabla 7.4. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM sin MIMO.....77

Tabla 7.5. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 2 x 2.78

Tabla 7.6. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 4 x 4.79

Tabla 7.7. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM sin MIMO.....80

Tabla 7.8. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 2 x 2.81

Tabla 7.9. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 4 x 4.82

Tabla 7.10. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK sin MIMO. ....85

Tabla 7.11. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 2 x 2.....86

Tabla 7.12. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 4 x 4.....87

Tabla 7.13. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM sin MIMO.....88

Tabla 7.14. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 2 x 2. .89

Tabla 7.15. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 4 x 4. .90

Tabla 7.16. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM sin MIMO.....91

Tabla 7.17. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 2 x 2. .92

Tabla 7.18. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 4 x 4. .93

Tabla 7.19. Comparativa de eNodosB necesarios en el dimensionamiento por tráfico en entorno urbano. ....95

Tabla 7.20. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK sin MIMO .....	103
Tabla 7.21. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 2 x 2... 104	
Tabla 7.22. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 4 x 4... 105	
Tabla 7.23. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM sin MIMO.....	106
Tabla 7.24. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 2 x 2. ....	107
Tabla 7.25. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 4 x 4. ....	108
Tabla 7.26. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM sin MIMO.....	109
Tabla 7.27. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 2 x 2. ....	110
Tabla 7.28. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 4 x 4. ....	111
Tabla 7.29. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK sin MIMO. ....	113
Tabla 7.30. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 2 x 2. ....	114
Tabla 7.31. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 4 x 4. ....	115
Tabla 7.32. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM sin MIMO. ....	116
Tabla 7.33. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 2 x 2.....	117
Tabla 7.34. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 4 x 4.....	118
Tabla 7.35. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM sin MIMO. ....	119

Tabla 7.36. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 2 x 2.....	120
Tabla 7.37. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 4 x 4.....	121
Tabla 7.38. Comparativa de eNodosB necesarios en el dimensionamiento por tráfico en entorno rural.....	123
Tabla 9.1. Número de eNodos B a desplegar en cada uno de los tres casos elegidos del entorno urbano .....	135
Tabla 9.2. Coordenadas de la ubicación de los eNodos B para el caso 1 .....	136
Tabla 9.3. Configuración para cada sector del caso 1 en RadioGIS, usando el modelo COST-231.....	137
Tabla 9.4. Configuración para cada sector del caso 1 en RadioGIS, usando el modelo Har-Xia-Bertoni .....	161
Tabla 9.5. Coordenadas de la ubicación de los eNodos B para el caso 2 .....	185
Tabla 9.6. Configuración para cada sector del caso 2 en RadioGIS, usando el modelo COST-231.....	187
Tabla 9.7. Configuración para cada sector del caso 2 en RadioGIS, usando el modelo Har-Xia-Bertoni .....	202
Tabla 9.8. Coordenadas de la ubicación de los eNodos B para el caso 3 .....	216
Tabla 9.9. Configuración para cada sector del caso 3 en RadioGIS, usando el modelo COST-231.....	217
Tabla 9.10. Configuración para cada sector del caso 3 en RadioGIS, usando el modelo Har-Xia-Bertoni .....	229
Tabla 9.11. Coordenadas de la ubicación de los eNodos B para el entorno rural.....	241
Tabla 9.12. Configuración para antena omnidireccional de entorno rural en RadioGIS, usando el modelo UIT R-526 .....	241



## 1. INTRODUCCIÓN

El mercado de las comunicaciones móviles continúa en constante evolución, pudiéndose observar en los novedosos terminales y en los actuales servicios de contenido. Con la creciente necesidad de conexiones con mayor estabilidad, como el “streaming” de vídeo, la tecnología 3G no satisface adecuadamente esta demanda, por lo que es necesaria la incorporación de una nueva tecnología que pueda alcanzar tasas mayores con un mayor ancho de banda. Esta tecnología es LTE (Long Term Evolution) y en este trabajo fin de Grado se ha llevado a cabo la planificación de este sistema en dos entornos diferentes.



Figura 1.1. Logo LTE

De acuerdo a [1], las principales mejoras que se pretendían con esta tecnología respecto a HSPA Release 6 pueden ser observadas en la Figura 1.2.

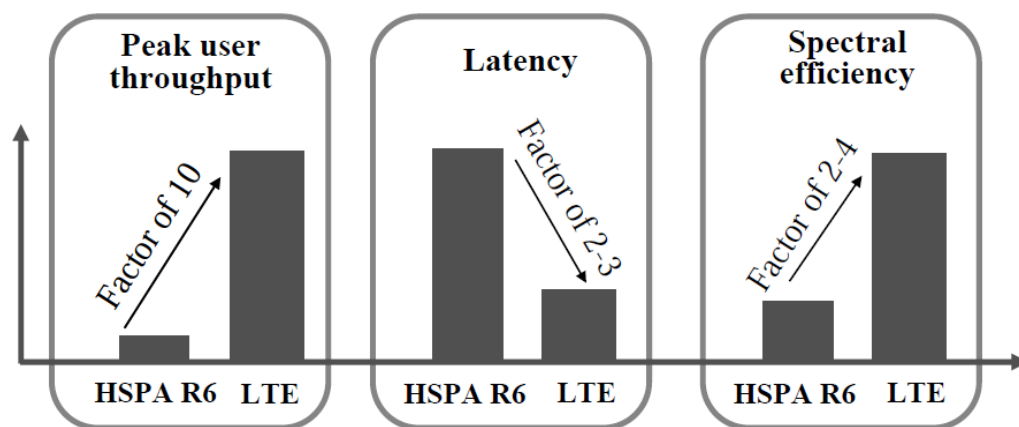


Figura 1.2. Principales objetivos de LTE [1]

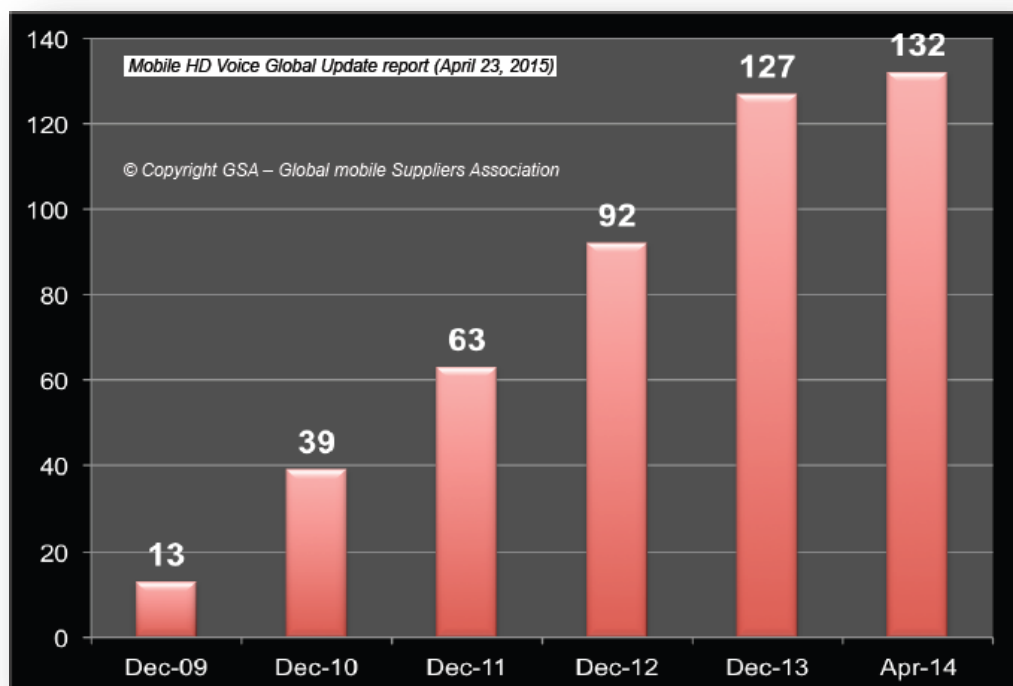
Sin embargo, estas no serían las únicas y están complementadas, entre otras, por las siguientes:

- Tasas de pico superiores a 100 Mbps en enlace descendente y 50 Mbps en enlace ascendente. Esto será posible gracias al uso de técnicas de múltiples antenas como es MIMO (Multiple Input Multiple Output).

## Apartado 1 – Introducción

- Alto nivel de seguridad y de movilidad. Esto implica rendimiento optimizado para velocidades del móvil comprendidas entre 0 y 15 km/h, funcionamiento adecuado en el rango de 15 a 120 km/h, soporta ciertas funciones de 120 a 350 km/h, y se encuentra en consideración para velocidades entre 350 y 500 km/h.
- Optimización en el consumo de potencia en el terminal, debido a la incorporación de un control de recursos radio (RRM, Radio Resource Management).
- Escalabilidad en frecuencia, con asignaciones de ancho de banda en un amplio rango desde 1,5 MHz hasta 20 MHz, tanto en el enlace ascendente como en el descendente.
- Compatibilidad de dispositivos, ya que el 98,4 % de dispositivos LTE son multimodo, pudiendo además hacer uso de la tecnología 3G [2].
- Implementación de VoLTE (Voice over LTE), un servicio de voz basado en la tecnología de tasa múltiple adaptativa en banda ancha (W-AMR, Adaptive Multi-Rate WideBand) [3].

En referencia a esta última característica, VoLTE, está siendo desplegado por multitud de operadores en todo el mundo, proporcionando a sus clientes llamadas de voz de alta calidad en redes móviles 4G con una mejorada experiencia de usuario [3]. En la Figura 1.3, se aprecia la evolución en número de operadores a nivel mundial que han ido ofreciendo servicio de voz HD, donde se incluyen los servicios en redes 2G/GSM, 3G/HSPA y 4G/LTE.

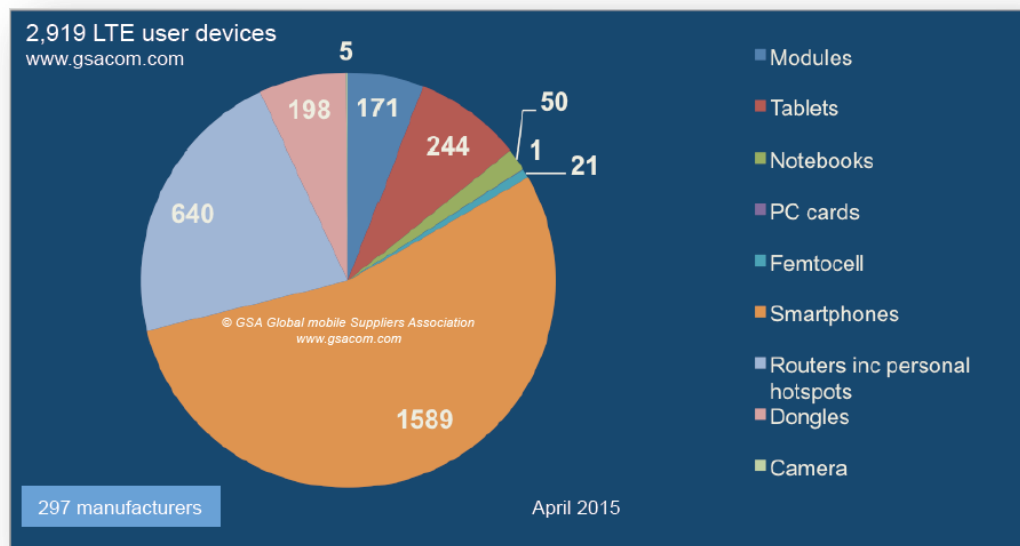


**Figura 1.3. Número de operadores móviles con servicio de voz HD [3]**

Por otro lado, dentro del ecosistema de dispositivos LTE, los smartphones son la categoría dominante. Tal y como se puede apreciar en la Figura 1.4, los smartphones ocupan una cuota



de mercado del 54,4 %, muy por encima del 21,9 % y del 8,3 % de routers y tablets 4G, respectivamente [4].



**Figura 1.4. Comparativa de uso de dispositivos LTE [4]**

La finalidad de este proyecto se basa en realizar un dimensionamiento para el despliegue de una red de Banda Ancha Móvil con tecnología LTE en la Región de Murcia. Para profundizar en el análisis de este, consideraremos dos situaciones diferenciadas: un primer área con una mayor densidad de población, como es la ciudad de Murcia (entorno urbano), y un segundo caso donde tenemos menor demanda, como es el municipio de Fortuna (entorno rural).

Estudiaremos el espectro radioeléctrico destinado a la explotación de LTE en España, incluyendo en este la interesante y recientemente liberada banda de 800 MHz que anteriormente era ocupada por la TDT (Televisión Digital Terrestre). Realizaremos una comparación de las bandas empleadas para esta tecnología, indicando ventajas e inconvenientes que cada una posee. Del mismo modo, se expondrán datos sobre la penetración y desarrollo que esta tecnología está consiguiendo tanto en España como en la Región de Murcia. Esto permitirá determinar de una forma más cercana a la realidad la demanda que se está produciendo por parte de los usuarios, analizando las nuevas tendencias en el uso de los servicios móviles en base a las prestaciones ofrecidas por LTE.

Además, a la hora de estimar el número de eNodos B necesarios, también se tendrán en cuenta ciertos parámetros como el *overhead*, la eficiencia espectral real al emplear la técnica MIMO (Multiple Input Multiple Output) o la calidad del canal, dada por el coeficiente CQI (Channel Quality Indicator). Finalmente, definiremos las localizaciones óptimas para atender la demanda de la población, proveer una eficaz calidad de servicio y otorgar cobertura total en la superficie de ambos casos.

Con la enorme utilidad y las numerosas ventajas que hemos podido resaltar sobre LTE, será de suma importancia dimensionar y planificar de forma correcta el que será el sistema de comunicaciones móviles dominante en el futuro.

## 2. ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA LTE

### 2.1. 3GPP

Estas son las siglas de lo que se conoce como Proyecto Asociación de Tercera Generación (3rd Generation Partnership Project), el cual se encuentra formado por varios grupos de especificación técnica en el campo de las telecomunicaciones. Esta asociación nació con el objetivo de definir un estándar para los sistemas móviles de tercera generación basados en la evolución de las redes GSM.

La 3GPP aporta distintos documentos donde refleja los requerimientos exigentes a las tecnologías de acceso, buscando así una continua evolución de estas. Los documentos publicados se dividen en versiones (*releases*), donde cada una añade nuevas capacidades sobre la versión anterior.

En noviembre de 2004, con la finalidad de asegurar que el sistema UMTS de tercera generación siguiese siendo competitivo en el futuro, la 3GPP decide comenzar un proyecto para definir la evolución a largo plazo de esta tecnología celular. Este es desarrollado a partir de la *Release 7* [5] y se le otorga el nombre de LTE. Aun así, la mejora de UMTS sigue paralelamente en proceso. En la Figura 2.1 podemos observar el desarrollo llevado en este proyecto, con las distintas versiones publicadas por la Asociación.

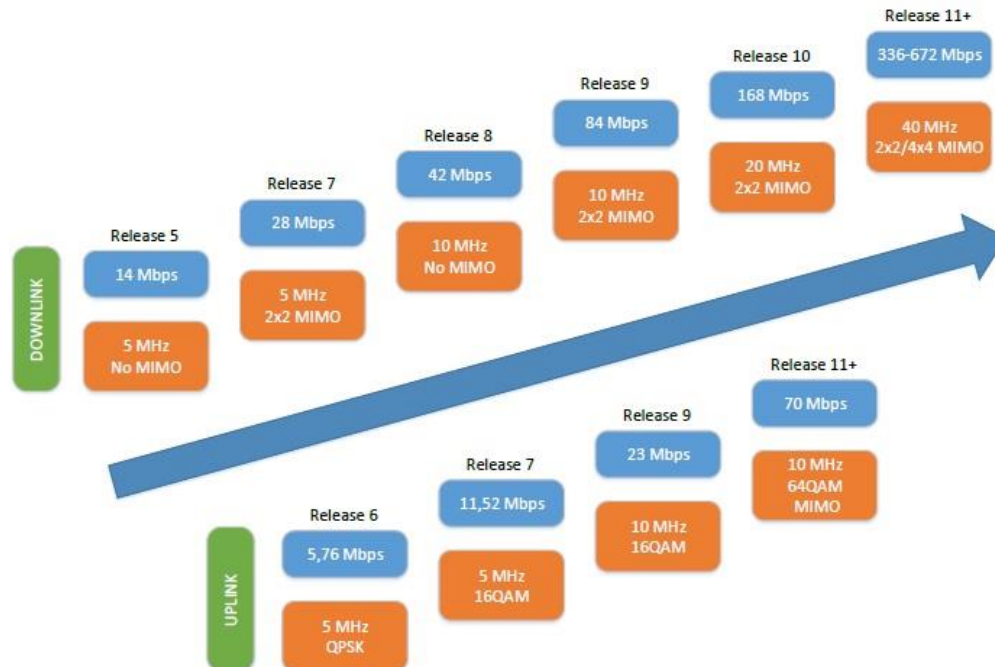


Figura 2.1. Velocidades y anchos de banda de las diferentes *releases* presentadas por la 3GPP [6]

## 2.2. INTRODUCCIÓN A LTE

Los requerimientos más importantes que incluía la 3GPP para la expansión de LTE eran: un reducido coste por bit, mejor provisión de servicio, uso flexible de las nuevas bandas de frecuencia así como de las ya existentes, arquitectura de red simplificada con interfaces abiertas, y una previsión para reducir el consumo de potencia en los terminales [5].

De este modo, el desarrollo de esta tecnología ha permitido conseguir mejores prestaciones y servicios. De hecho, la *Release 10* de LTE pasó a denominarse LTE Advanced, popularmente conocida como 4G.

En la Figura 2.2, podemos observar el estado del ecosistema LTE a nivel mundial, actualizado a 9 de abril del presente año, donde se puede apreciar que el número de países que ya están ofreciendo este servicio es superior a dos tercios de la superficie mundial.

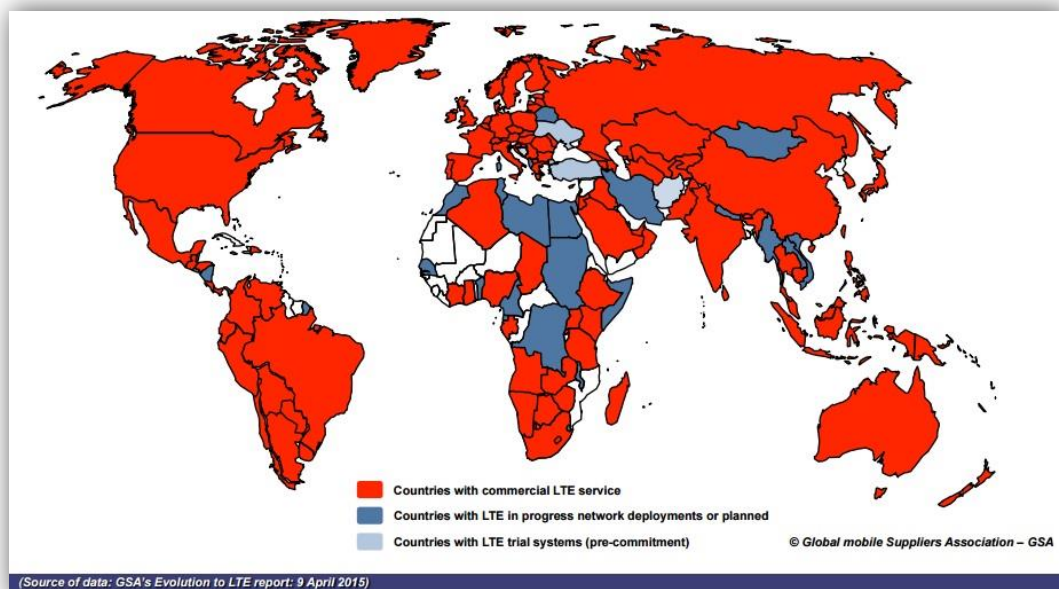


Figura 2.2. Mapa mundial de situación de la tecnología LTE [7]

## 2.3. ARQUITECTURA DE RED

Las principales motivaciones que propiciaron el proyecto de nueva generación eran la mejora del acceso radio de UMTS, E-UTRA, (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access) y la mejora de la red que permite dicho acceso radio (E-UTRAN, Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network). Tal y como se comenta en [5], la 3GPP propuso un sistema mejorado de paquetes (EPS, Evolved Packet System), el cual era el resultado del desarrollo de dos factores: un nuevo núcleo de red compuesto sólo por paquetes (EPC, Evolved Packet Core) y la anteriormente mencionada red de acceso radio (RAN), combinación de E-UTRA y E-UTRAN.

La arquitectura de red de LTE está dividida, tal y como se ve en la Figura 2.3, en cuatro secciones: Terminal de Usuario (UE), la red E-UTRAN, el nuevo núcleo de red ya mencionado (EPC) y la capa de servicios.

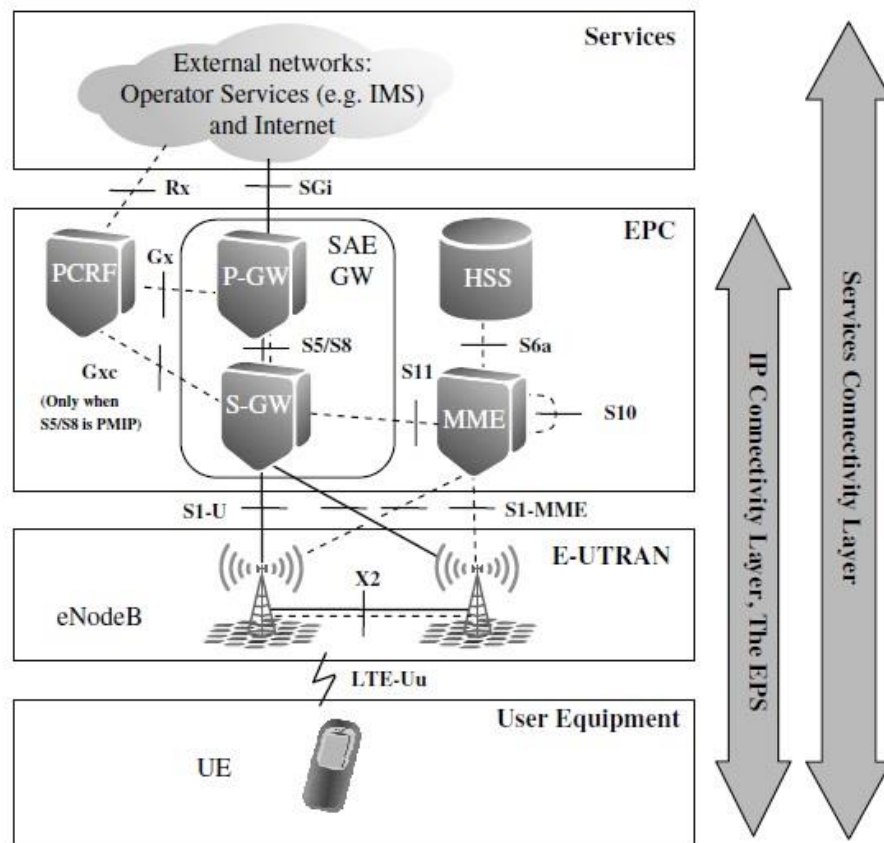


Figura 2.3. Arquitectura del sistema considerando únicamente la red de LTE [1]

### 2.3.1. TERMINAL DE USUARIO (UE)

Como veíamos en la Figura 1.4, hay muchos tipos de dispositivos con los que cualquier persona puede acceder a la red LTE.

Cada UE porta un módulo USIM (Universal Subscriber Identity Module) el cual identifica al usuario. Las funciones que el UE ostenta son las de establecimiento, mantenimiento y finalización de las comunicaciones con la red, así como la del control sobre la movilidad del propio terminal.

Una de las mejoras importantes de LTE que se comentó en la introducción es el ahorro de energía. Este se consigue gracias a un mecanismo para una gestión más eficiente de los recursos radio, que se denomina Control de Recursos Radio (RRC o Radio Resource Control), el cual incluye un estado inactivo o *idle* en el terminal que permite una reducción energética considerable sin la pérdida de la movilidad.

Existen cinco categorías de UE, las cuales se diferenciarán por las prestaciones otorgadas.

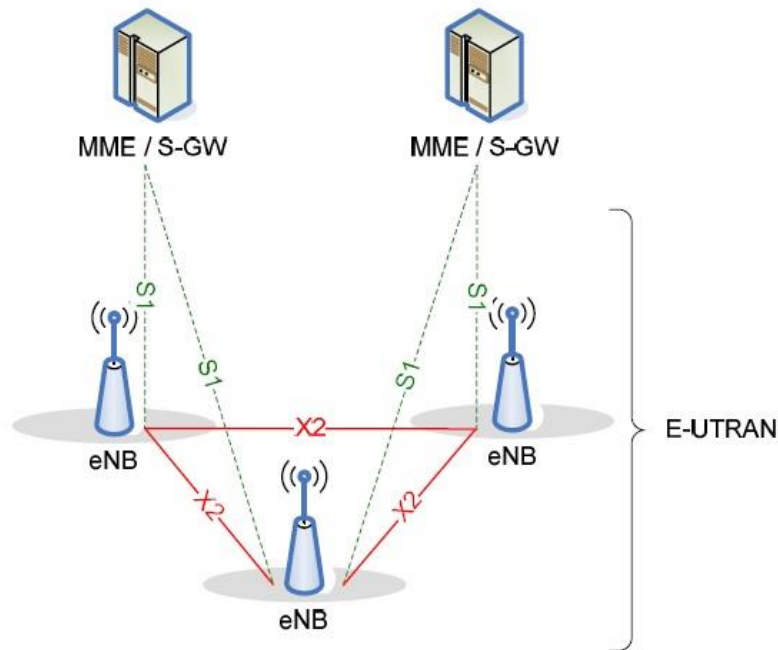
Algunas de estas se exponen en la Tabla 2.1.

	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
<b>Velocidad máxima para DL</b>	10 Mbps	50 Mbps	100 Mbps	150 Mbps	300 Mbps
<b>Velocidad máxima para UL</b>	5 Mbps	25 Mbps	50 Mbps	50 Mbps	75 Mbps
<b>Modulación mayor posible para DL</b>	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM
<b>Modulación mayor posible para UL</b>	16QAM	16QAM	16QAM	16QAM	64QAM
<b>MIMO para DL</b>	Opcional	2 x 2	2 x 2	2 x 2	4 x 4

**Tabla 2.1. Categorías de terminales en LTE [8]**

### 2.3.2. RED DE ACCESO RADIO UMTS EVOLUCIONADA (E-UTRAN)

La introducción de este elemento hace que se unifiquen las funcionalidades del nodo B y el RNC de UMTS en un único objeto, llamado nodo B evolucionado (e-NodoB). Este añade nuevas funciones como la gestión de los recursos radio, la encriptación/desenciptación de la información transmitida en los planos de usuario y control o el traspaso de llamadas (*handover*). De esta manera, la comunicación entre estaciones base cercanas es mucho más directa, bajando los costos de mantenimiento y actualización.



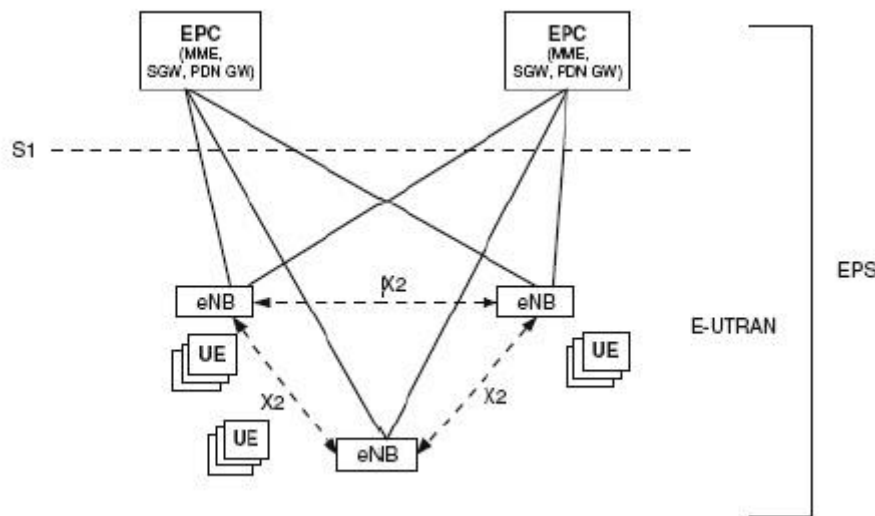
**Figura 2.4. Interconexiones en la red E-UTRAN [9]**

En la Figura 2.4 podemos ver las distintas interfaces de comunicación existentes. La interfaz X2 sirve para la conexión directa entre e-NodosB, mientras que la interfaz S1 permite extender la red hacia el EPC. Asimismo, es la única entidad de la red que interactúa de manera directa con los UEs.

### 2.3.3. NÚCLEO EVOLUCIONADO DE PAQUETES (EPC)

La principal novedad que incorpora LTE consiste en que tanto los servicios de voz como de datos sean tráfico de paquetes. Por esto se dice que es una arquitectura basada en IP, eliminando la conmutación de circuitos empleada en la anterior generación.

En la Figura 2.5 se presentan las interfaces que forman parte del EPS, que como decíamos anteriormente, está formado por el EPC y la E-UTRAN.



**Figura 2.5. Estructura del sistema EPS [10]**

Este núcleo de red está compuesto por tres entidades: la entidad de gestión de movilidad (MME o *Mobility Management Entity*), la puerta de enlace servidora (S-GW o *Serving Gateway*) y la puerta de enlace a la red de paquetes de datos (PDN-GW o *Packet Data Network Gateway*). Estas dos últimas conforman la puerta de enlace de la evolución de la arquitectura del sistema (SAE Gateway o System Architecture Evolution).

En el caso de la MME, esta se encuentra en el plano de control, por lo que únicamente gestiona paquetes con tráfico de señalización. Por ello, interactúa con el Servidor de Suscriptores Abonados (HSS o Home Subscriber Server) para la correcta gestión de la movilidad de los usuarios. Esta entidad se encarga de hacer la selección apropiada tanto del S-GW como del PDN-GW para la comunicación con el UE.

Por otro lado, la SAE Gateway está dedicada al plano de usuario a través de la PDN-GW y la S-GW. El primero, es el punto de entrada y salida de tráfico desde la EPC hacia el exterior, por ende sirve para el control y encaminamiento de los paquetes a otras redes de datos externas. En segunda instancia, la S-GW se encarga de la transferencia de datos entre la red radio y la MME, de modo que gestionará la movilidad entre estaciones base.

Además, toda esta arquitectura de red estará completamente integrada con las generaciones anteriores, para que todo funcione correctamente independientemente de la tecnología empleada.

### 2.3.4. CAPA DE CONECTIVIDAD DE SERVICIOS

Este apartado describe la actividad de la capa superior de la Figura 2.3. El más importante de los servicios que otorga viene dado por el Sub-Sistema de Servicios Multimedia IP (IMS o IP Multimedia Sub-System). Este sistema proporciona la base para tráfico de voz, datos, vídeo e imágenes a través de una infraestructura basada únicamente en la transmisión de paquetes por medio de direcciones IP. Se puede observar su conexionado con las capas inferiores en la Figura 2.6.



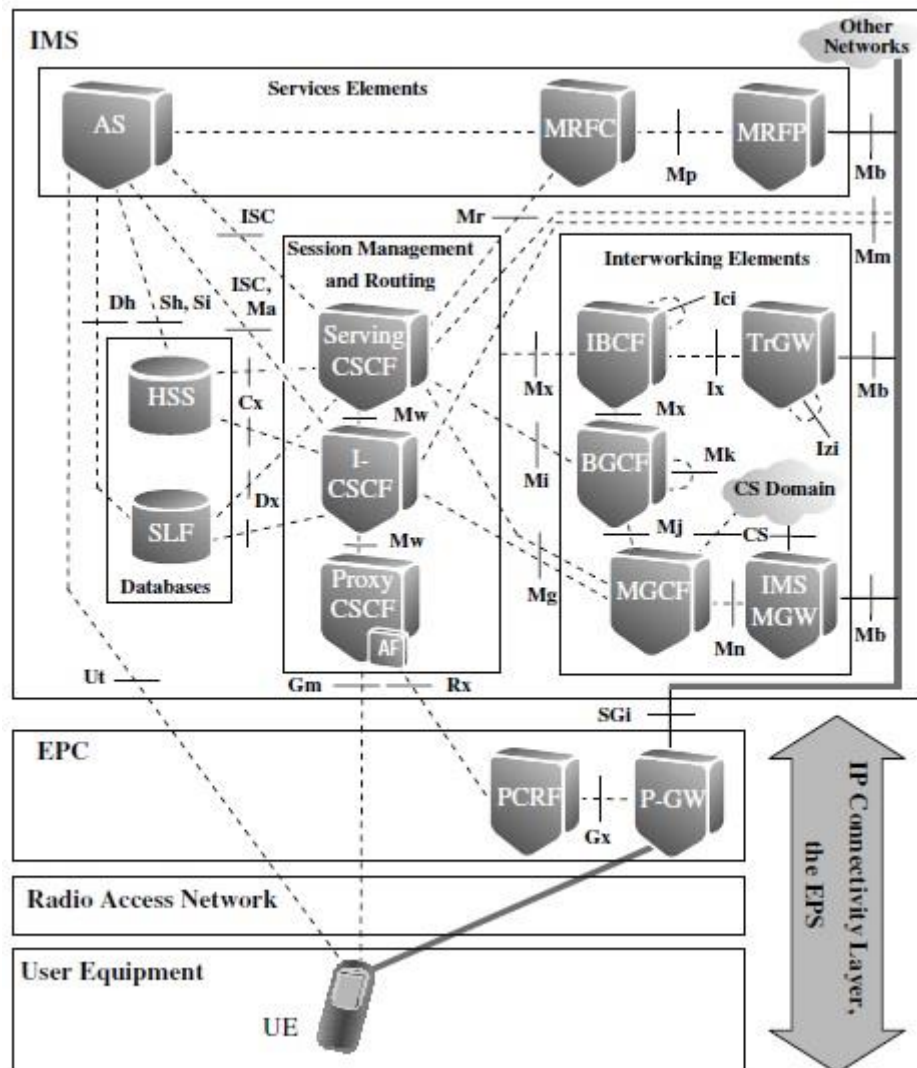


Figura 2.6. Conexiones con el IMS [1]

Esta arquitectura necesita de un protocolo para el registro de los usuarios que se denomina Protocolo de Inicio de Sesión (Session Initiation Protocol o SIP). Basado en los estándares de Internet, su función es la gestión de las sesiones IMS entre dispositivos, abarcando el establecimiento, modificación y finalización de las mismas.

Sobre este proceso se apoya la implementación de VoLTE, la cual necesita de la plataforma IMS para su funcionamiento y cuyo objetivo es proporcionar la capacidad de utilizar la red LTE para gestionar llamadas de voz.



## 2.4. CAPA FÍSICA DE LTE: INTERFAZ RADIO

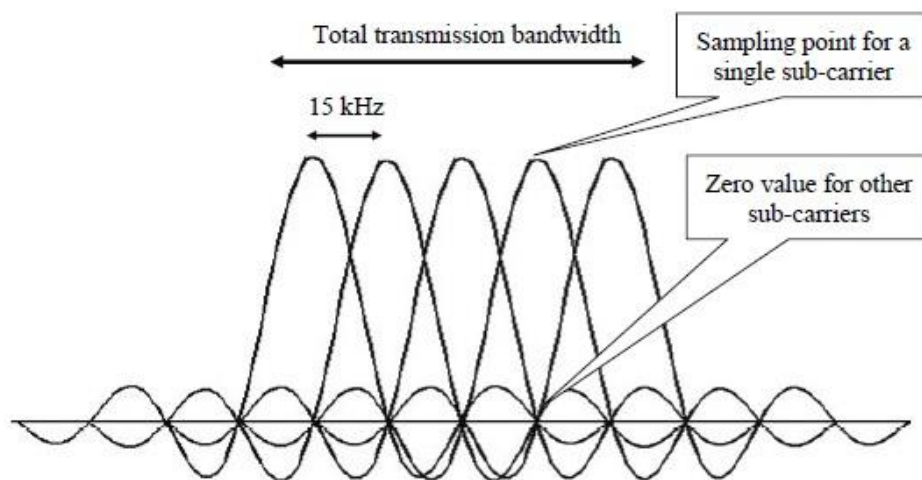
### 2.4.1. TÉCNICAS DE ACCESO AL MEDIO

En LTE, las transmisiones tanto en el enlace ascendente como en el descendente están basadas en el uso de tecnologías de acceso múltiple. En el caso del enlace descendente tenemos acceso múltiple por división en frecuencia ortogonal (OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access), mientras que para el enlace ascendente se hace uso del acceso múltiple por división en frecuencia con portadora única (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA).

#### 2.4.1.1. ENLACE DESCENDENTE: OFDMA

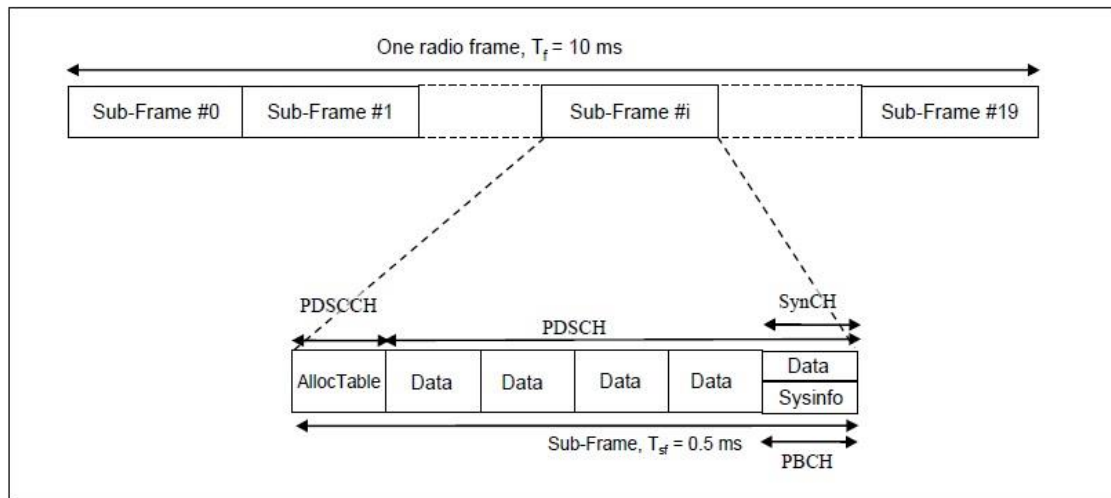
Esta técnica es una variante de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing), y se emplea principalmente debido a la simplicidad del receptor. El funcionamiento de OFDM, en lugar de transmitir un flujo de datos a una tasa elevada y con una única portadora, consiste en emplear un amplio número de subportadoras que se transmiten en paralelo.

En la Figura 2.7 se puede observar el principio de ortogonalidad entre subportadoras. Asimismo, en el instante de muestreo de una única subportadora el resto tendrán valor nulo.



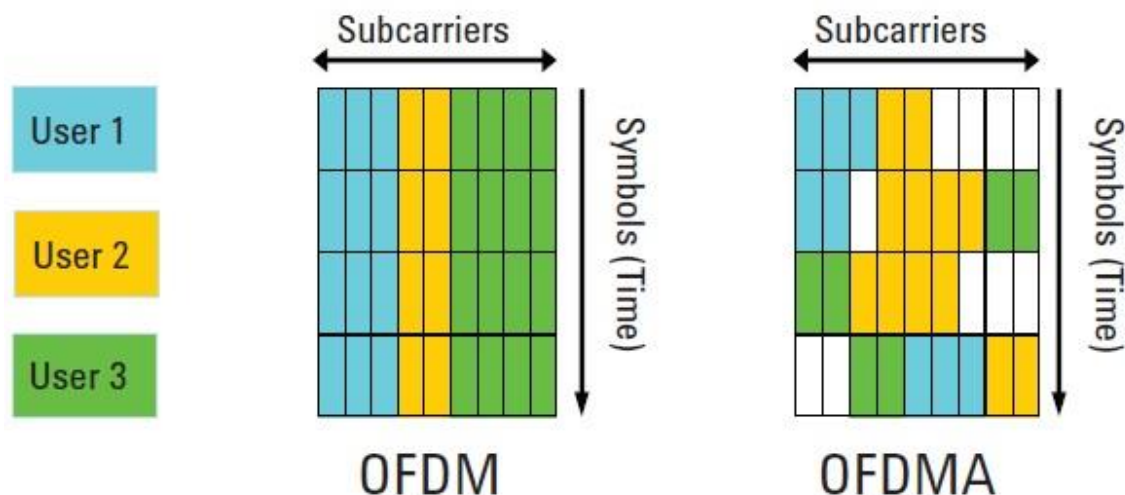
**Figura 2.7. Visualización de la ortogonalidad entre subportadoras [1]**

El espaciado existente entre subportadoras contiguas es de 15 kHz, mientras que 12 subportadoras compondrían un bloque de recurso (RB, Resource Block), que es la unidad mínima en tiempo y frecuencia. Con esto, un bloque de recurso abarca 180 kHz en frecuencia. Además, en cada slot, cuya duración es de 0,5 ms, se envían 7 símbolos OFDM. Dos slots de tiempo formarían una subtrama de 1 ms, siendo este el mínimo intervalo de tiempo de transmisión (TTI, Transmission Time Interval). Varios TTIs pueden ser utilizados por un usuario, así como varios RBs. Finalmente, tal y como se expone en la Figura 2.8, una trama está compuesta por 10 subtramas, teniendo una duración final de 10 ms.



**Figura 2.8. Estructura de trama en el enlace descendente, considerando CP largo [11]**

Una característica clave de OFDM es la asignación dinámica de recursos, denominada *scheduling*, que sólo requiere de una comprobación en tiempo real de las condiciones del canal. Esto permite reasignar de manera dinámica subconjuntos de subportadoras entre los distintos usuarios que usan el canal. Por tanto, a dos usuarios situados en dos células limítrofes se les puede asignar los mismos recursos siempre y cuando la ubicación de cada uno minimice la interferencia co-canal. Para aplicar correctamente *scheduling* es necesario conocer el canal móvil de cada usuario, así como su ubicación. Se puede observar la aplicación de esto en la Figura 2.9.



**Figura 2.9. Comparación en la asignación de subportadoras entre OFDM y OFDMA [5]**

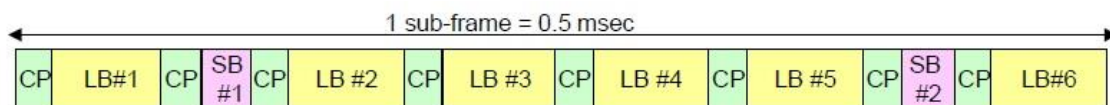
Esta optimización de recursos proporciona un sistema con una mayor robustez y un incremento en la capacidad, ya que el *scheduling* mejora el desvanecimiento selectivo en frecuencia. Como en nuestra planificación vamos a tratar con un número reducido de usuarios, supondremos que se puede aplicar esta técnica en nuestro sistema LTE.

Por otro lado, OFDM también tiene algunas dificultades. El hecho de que la separación entre subportadoras sea muy pequeña provoca que en recepción se deba tener en cuenta la posibilidad de errores de frecuencia, debidos a ruido de fase o efecto Doppler. Otra característica de OFDM es la inserción de un intervalo de guarda (GI) entre símbolos adyacentes, donde se sitúa el prefijo cíclico (CP, Cyclic Prefix). Este es colocado en el inicio del símbolo OFDM transmitido y se corresponde con una copia de la parte final del mismo símbolo, lo cual proporciona protección frente al efecto multicamino.

#### 2.4.1.2. ENLACE ASCENDENTE: SC-FDMA

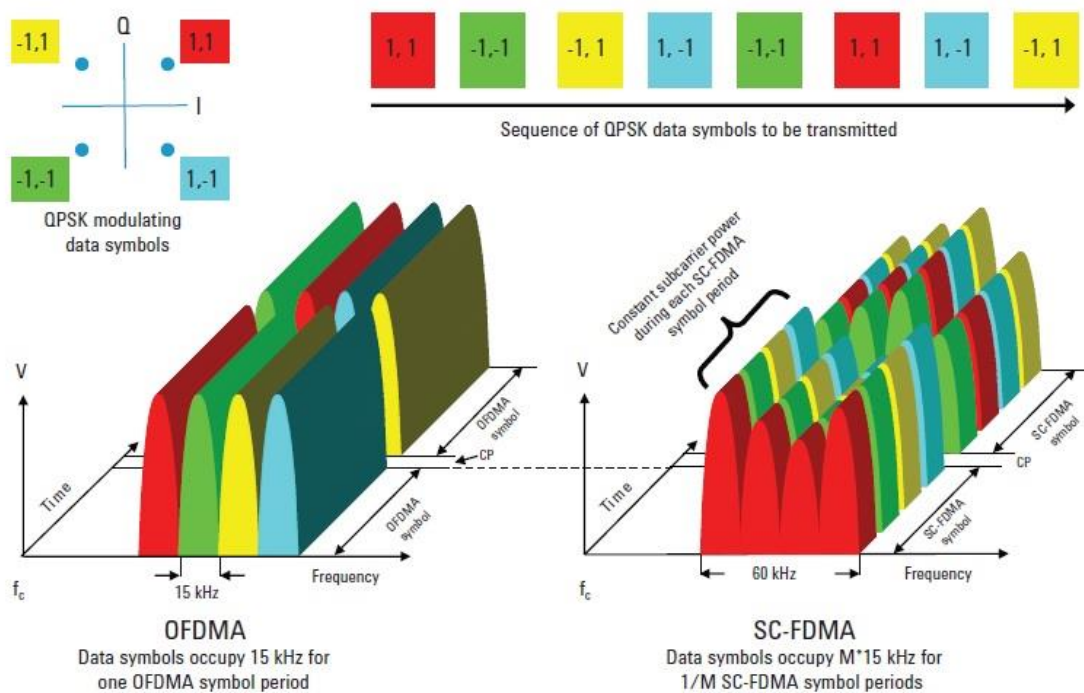
La 3GPP tomó la decisión de utilizar una técnica diferente para el enlace ascendente, debido, entre otros aspectos, a la alta tasa del parámetro de potencia de pico a potencia media (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) que poseía OFDM. Se sabía que los sistemas de transmisión de portadora única conservaban técnicas para obtener un bajo nivel de PAPR, por lo que si a eso le sumabas la resistencia al multicamino y la flexibilidad de asignación otorgada por OFDMA, conseguíamos como resultado SC-FDMA.

La estructura de trama para el enlace ascendente es la presentada en la Figura 2.10.



**Figura 2.10. Estructura de trama en el enlace ascendente [11]**

En la Figura 2.11, podemos ver una comparación de las tecnologías OFDMA y SC-FDMA.



**Figura 2.11. Comparación de transmisión mediante OFDMA y SC-FDMA [5]**

La diferencia más notable que se puede apreciar en el ejemplo de la Figura 2.11 es que con OFDMA se transmiten los 4 símbolos de datos en paralelo, uno por subportadora, mientras que SC-FDMA transmite los 4 símbolos en serie pero a 4 veces la velocidad de OFDMA, donde cada símbolo ocupa un ancho de banda de  $M \times 15$  kHz.

## 2.4.2. MODOS DE DUPLEXADO

La interfaz de LTE soporta tanto FDD (Frequency Division Duplex) como TDD (Time Division Duplex). Considerando duplexado por división en frecuencia, la trama empleada en cada enlace es la descrita en la Figura 2.8, con 10 subtramas y una duración de 10 ms. Sin embargo, en el duplexado por división en el tiempo sólo se hace uso de una trama compartida por ambos enlaces, donde unas tramas corresponden al enlace ascendente y otras al descendente.

Como podemos ver en la Tabla 2.2, el espectro asignado a FDD hace uso de bandas pares, una para cada enlace. Por otro lado, como se observa en la Tabla 2.3, TDD únicamente requiere de una banda, siendo esta frecuencia compartida por ambos enlaces pero separadas en el tiempo.

Band Number	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Band Gap (MHz)	Duplex Separation (MHz)	UMTS Usage	LTE Usage
	$F_{UL, low} - F_{UL, high}$	$F_{DL, low} - F_{DL, high}$				
1	1920–1980	2110–2170	130	190	Y	Y
2	1850–1910	1930–1990	20	80	Y	Y
3	1710–1785	1805–1880	20	95	Y	Y
4	1710–1755	2110–2155	355	400	Y	Y
5	824–849	869–894	20	45	Y	Y
6*	830–840	875–885	35	45	Y	Y
7	2500–2570	2620–2690	50	120	Y	Y
8	880–915	925–960	10	45	Y	Y
9	1749.9–1784.9	1844.9–1879.9	60	95	Y	Y
10	1710–1770	2110–2170	340	400	Y	Y
11	1427.9–1447.9	1475.9–1495.9	28	48	Y	Y
12	698–716	728–746	12	30	Y	Y
13	777–787	746–756	21	31	Y	Y
14	788–798	758–768	20	30	Y	Y
17	704–716	734–746	18	30	N	Y
18**	815–830	860–875	30	45	N	Y
19**	830–845	875–890	30	45	Y	Y
20**	832–862	791–821	11	41	Y	Y
21**	1447.9–1462.9	1495.9–1510.9	33	48	Y	Y
23***	2000–2020	2180–2200	160	180	N	Y
24***	1626.5–1660.5	1525–1559	-135.5	-101.5	N	Y
25***	1850–1915	1930–1995	15	80	Y	Y
26****	814–849	859–894	10	45	Y	Y

**Tabla 2.2. Bandas de frecuencia en UMTS y LTE para FDD [11]**

Band	$F_{low} - F_{high}$ (MHz)	UMTS	LTE
33	1900–1920	Y	Y
34	2010–2025	Y	Y
35	1850–1910	Y	Y
36	1930–1990	Y	Y
37	1910–1930	Y	Y
38	2570–2620	Y	Y
39	1880–1920	N	Y
40	2300–2400	Y	Y
41*	2496–2690	N	Y
42*	3400–3600	N	Y
43*	3600–3800	N	Y

**Tabla 2.3. Bandas de frecuencia en UMTS y LTE para TDD [11]**

### 2.4.3. MODULACIONES

En LTE la calidad de la señal recibida depende de distintos factores como el nivel de interferencia con otras celdas, el nivel de ruido y la calidad del canal empleado. Para optimizar la transmisión de información lo que se hace es adaptar la tasa de bits a las variaciones del medio. Esto es lo que se conoce como AMC (Adaptive Modulation and Coding, Modulación y Codificación Adaptativa).

LTE hace uso de las modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM, donde el número de bits por símbolo es de 2, 4 y 6 respectivamente. Cuando nuestra comunicación presente un alto nivel de SINR (Relación Señal a Interferencia y Ruido), se emplearán modulaciones de mayor nivel (p.e. 64-QAM). Aunque esta sea más sensible a errores proporciona un mayor flujo de datos. Por otro lado, si las condiciones en nuestro enlace son limitadas, prevalecerá el uso de modulaciones más bajas (p.e. QPSK), para así dar mayor robustez a pesar de tener una tasa menor. En el caso de la codificación ocurre lo mismo. En caso de darse una situación favorable la tasa de código podrá ser más elevada, pero si el estado del canal es de peor calidad entonces la eficiencia en la codificación también se ve reducida.

En la comunicación establecida tanto en el enlace ascendente como en el descendente, el esquema de modulación y codificación que se asigna viene dado por un factor denominado CQI (Channel Quality Indicator, Indicador de Calidad del Canal). En el caso del ascendente, la calidad presente en el canal es estimada por el e-NodoB. Sin embargo, los parámetros del enlace descendente dependerán del informe acerca del CQI que envíe el UE, que es en lo que el e-NodoB se basa para configurar la transmisión.

La relación presente entre el índice CQI, la modulación asignada y la tasa de código correspondiente, viene dada en la Tabla 2.4.

ÍNDICE CQI	MODULACIÓN	TASA DE CÓDIGO
0	No hay transmisión	-
1	QPSK	0,076
2	QPSK	0,1172
3	QPSK	0,1885
4	QPSK	0,3008
5	QPSK	0,4385
6	QPSK	0,5879
7	16QAM	0,3691
8	16QAM	0,4785
9	16QAM	0,6016
10	64QAM	0,4551
11	64QAM	0,5537
12	64QAM	0,6504
13	64QAM	0,7539
14	64QAM	0,8525
15	64QAM	0,9258

Tabla 2.4. Tabla de CQI [12]

#### 2.4.4. ESCALABILIDAD DE ANCHO DE BANDA

Una de las características más importantes de LTE es el soporte de anchos de banda variables, desde 1,5 hasta 20 MHz, lo cual aporta gran flexibilidad al sistema. Por otro lado, independientemente de la cantidad de espectro proporcionado, el espaciado entre subportadoras será siempre de 15 kHz, tal y como se comenta en el apartado 2.4.1.1.

El ancho de banda empleado para el canal tiene relación directa con el número de bloques de recurso que le serán otorgados al usuario, y por tanto, como con la velocidad final presente en el enlace. En la Tabla 2.5 se puede observar el incremento de RB a mayor ancho de banda.

Ancho de banda (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Nº de RBs	6	15	25	50	75	100

**Tabla 2.5. Número de bloques de recurso en función del ancho de banda [1]**

#### 2.4.5. TÉCNICA MIMO

Al igual que ocurría en HSPA+, en LTE se considera el uso de dos o más antenas tanto en la estación base (e-NodoB) como en el UE. Esta tecnología incorpora el método de acceso de múltiples antenas en el receptor y transmisor (MIMO) para lograr el aumento de la velocidad de transferencia, que variará dependiendo de la cantidad de antenas agregadas.

La técnica MIMO tiene dos modos de funcionamiento: modo de multiplexación espacial y modo de transmisión por diversidad. El primer método permite transmitir distintos flujos de datos por cada una de las antenas, por lo que al ser transmitidos de manera simultánea, se produce un aumento en la tasa de datos. En el caso del segundo método, se trata de utilizar la diversidad para otorgar mayor robustez a la transmisión. Todas las antenas envían esencialmente la misma información, con lo que aprovecha la propagación multicamino para reducir la tasa de error y así aumentar la tasa de transmisión.

Para el uso de esta técnica, se pueden llevar a cabo diferentes configuraciones, atendiendo a las condiciones del enlace a diseñar: para enlace descendente disponemos de 2x2, 4x2 y 4x4, mientras que para enlace ascendente se puede hacer uso de 1x2 y 1x4. Con esto, sabemos que para el enlace ascendente el sistema hace siempre uso de una configuración SISO (Single Input Single Outputs). Es decir, el UE transmite por una sola antena varios canales y el e-NodoB recibe la información de varios canales por varias antenas.

Las tasas de datos que se alcanzan en la transmisión de información dependerán de diversos factores como la codificación, la categoría del UE, el ancho de banda, la modulación o la configuración MIMO dispuesta.

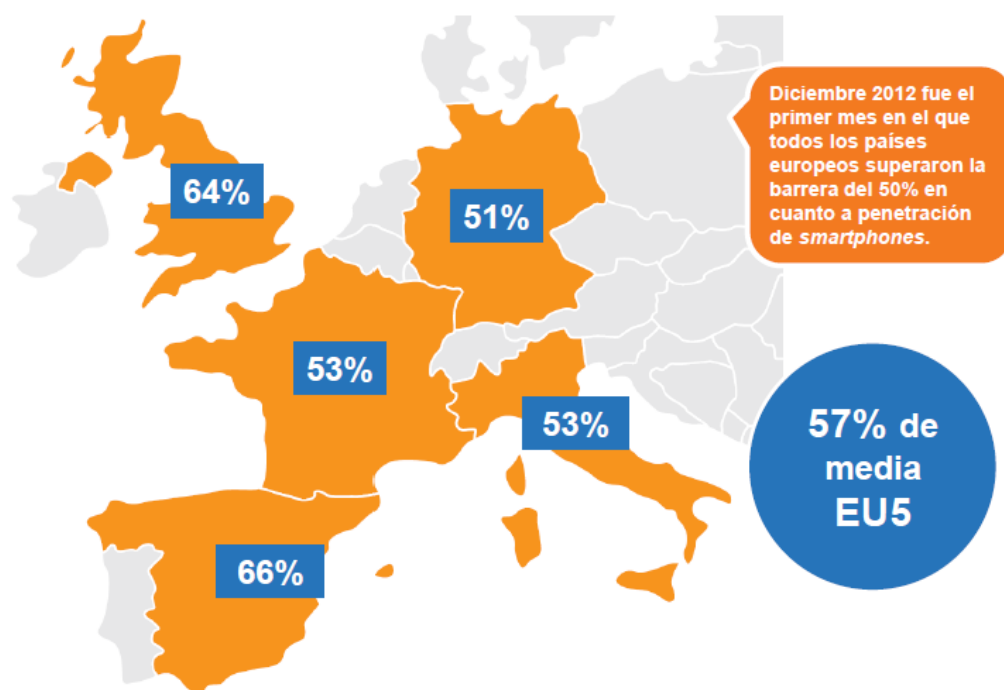


### 3. GRADO PENETRACION LTE EN ESPAÑA Y REGION DE MURCIA. BANDAS LICENCIADAS EN ESPAÑA

#### 3.1. LTE EN ESPAÑA

El consumo de contenidos digitales a través de dispositivos móviles está continuamente en crecimiento. Es una realidad que el acceso a, por ejemplo, redes sociales o servicios multimedia a través de los terminales ha aumentado, en detrimento de su uso a través del PC.

En primer lugar, podemos ver en la Figura 3.1 una comparación de la penetración del teléfono inteligente en diferentes países de Europa. Los datos mostrados en la figura tienen fecha de finales de 2012, momento en el que la entrada del Smartphone superó el 50 % en todos los países europeos. Tal y como se muestra, el porcentaje en España en ese momento era mayor que otros importantes países como Alemania, Reino Unido, Francia o Italia, además de ser muy superior a la media de estos.



**Figura 3.1. Comparación de la irrupción del Smartphone en EU5 [13]**

Ante la aparición de esta nueva tecnología, hubo que buscar frecuencias disponibles en el espectro radioeléctrico que permitiesen su explotación. En Europa fue autorizado el uso de tres bandas de frecuencia: 800 MHz, 1800 MHz y 2600 MHz.

Todos los operadores de telefonía estaban interesados en dar uso a la banda de 800 MHz pero esta frecuencia se encontraba inicialmente ocupada por la Televisión Digital Terrestre (TDT), por lo que en un principio se comenzaron los despliegues de redes en las dos bandas superiores. El problema inicial que se planteaba en torno a las frecuencias de 1800 y 2600



MHz es diferente en cada caso. La primera banda se encuentra saturada por los servicios de segunda y tercera generación (2G y 3G), mientras que, en el caso de la segunda, al ser una frecuencia ciertamente elevada no tiene un alcance óptimo.

Tal y como aparece en [14], las frecuencias para el uplink y para el downlink empleadas en cada banda y en todo el territorio nacional son las reflejadas en la Tabla 3.1.

Frecuencia (MHz)	Frecuencia <i>uplink</i> (MHz)	Frecuencia <i>downlink</i> (MHz)
2600	2500-2570	2620-2690
1800	1710-1785	1805-1880
800	832-862	791-821

**Tabla 3.1. Frecuencias destinadas a explotación de LTE en España [14]**

A mediados del año 2013, las compañías Vodafone, Orange y Yoigo daban el inicio al 4G LTE en España. Las dos primeras comenzaron empleando tanto la banda de 1800 MHz como la de 2600 MHz, haciendo uso del *refarming* que les permite emplear cualquier banda sin importar la tecnología. Por otra parte, la tercera proveedora, al no tener posesión de licencia en la banda de 800 MHz, no tenía por qué esperar al *Dividendo Digital* y desplegó su red de 4G LTE únicamente en la banda de 1800 MHz.

En la Figura 3.2, se puede ver la evolución cronológica del despliegue de las redes de esta tecnología durante el año 2013 y 2014 en todo el territorio nacional.

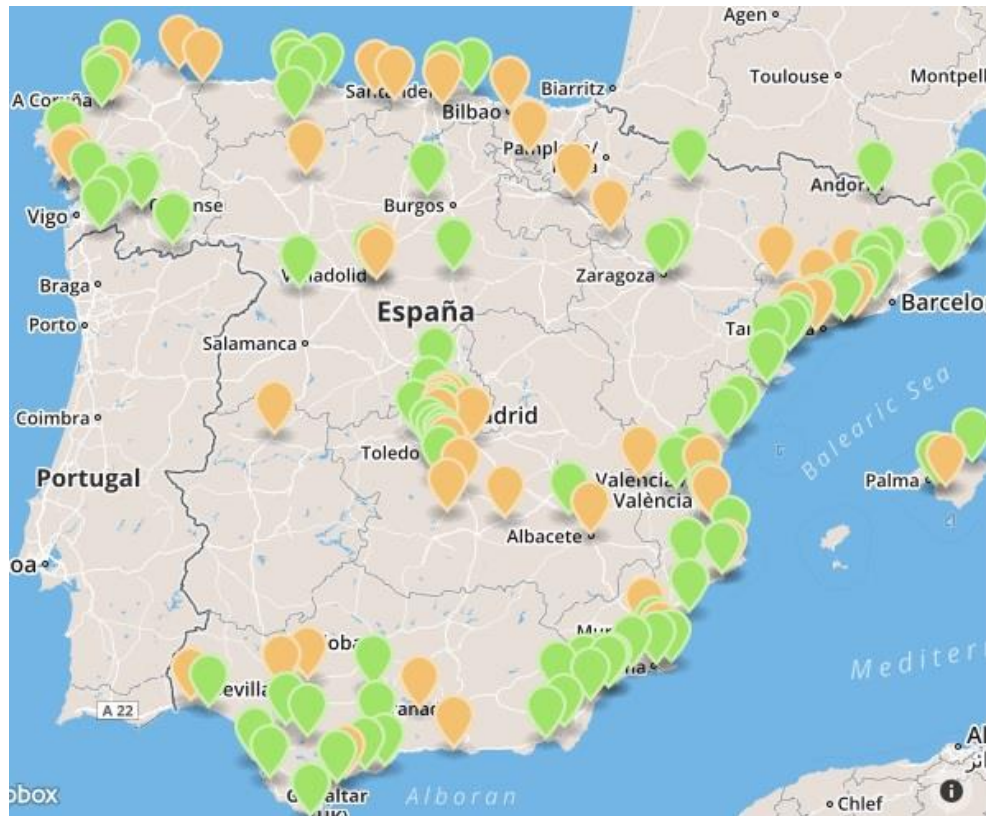


**Figura 3.2. Calendario de despliegue de LTE en España [15]**

Según [15], Yoigo acabó el 2013 con una cobertura 4G LTE del 37 % de la población, aunque su objetivo era cubrir el 75 % para finales de 2014, con una inversión total de 200 millones de euros y 5.500 antenas LTE. Por otra parte, el objetivo de Orange es llegar a todas las capitales de provincia una vez que puedan hacer uso de la banda de 800 MHz, con una inversión total de 400 millones de euros al tener que renovar más de 15.000 emplazamientos. En relación a la británica Vodafone, estaba otorgando en el año 2014 cobertura 4G en 619 municipios, entre los que se encuentran las 80 ciudades con más de 70.000 habitantes, todas las capitales de provincia y las zonas más turísticas [16]. La principal proveedora del país, Movistar, añadió en 2014 otros 62 municipios a su red, alcanzando la totalidad de 350 poblaciones. Para final de este año 2015, prevé llegar a todas las poblaciones de 5.000 habitantes gracias a la incorporación de la banda de 800 MHz [16].

En relación a esta última banda de 800 MHz, el interés en darle uso se debe a que a esta frecuencia tiene mejores propiedades de propagación y penetración en interiores de edificios, además de que, al ser una banda de menor frecuencia, los costes de la inversión también serán menores. Como beneficio para el consumidor, siempre que trabajemos a una frecuencia menor el consumo de batería del terminal móvil también será menor, lo cual implica una mayor autonomía de este.

La ciudad de Zamora fue la pionera en el uso de la banda de 800 MHz, ya que fue la primera ciudad española en liberar el Dividendo Digital [17]. El despliegue en esta ciudad serviría como modelo para implantarlo de igual manera en el resto España. Los distintos proveedores de servicio decidieron elegir Zamora para la prueba piloto debido a que el conjunto de frecuencias asignadas a la televisión digital en la provincia se encontraban en su mayoría por debajo de los 800 MHz. De esta manera, la reordenación de los canales es de mayor sencillez y el proceso de adecuación se podía agilizar. Si bien la expansión del sistema al resto del país estaba pensada para el comienzo de este año, esta se pospuso en favor de la TDT hasta abril debido a la mala programación llevada a cabo por el Gobierno de España. En estos momentos, ya se puede disfrutar de esta frecuencia en numerosas ciudades, municipios y pueblos, tal y como muestra la Figura 3.3.

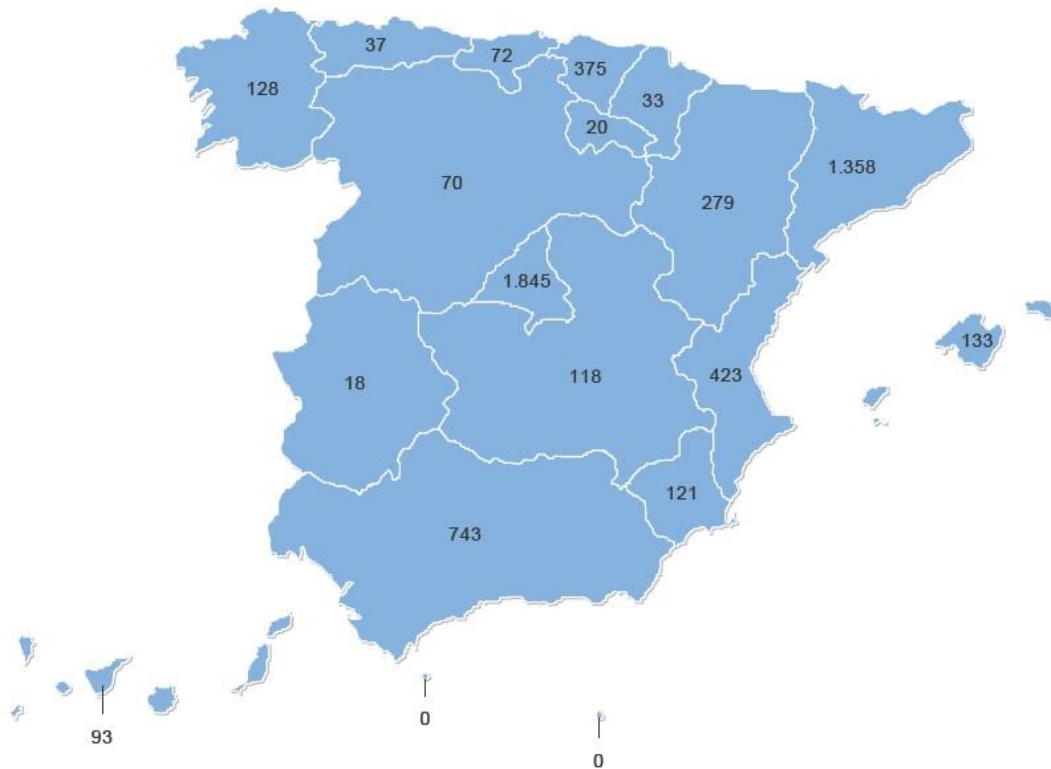


**Figura 3.3. Ubicación de todos los eNodos-B de 800 MHz desplegados por todas las operadoras en España [18]**

Los iconos verdes de la figura indican que esos nodos ya se encuentran operativos, mientras que los nodos naranjas van relacionados con estaciones pendientes de ser adaptadas a esa frecuencia.

### 3.2. LTE EN LA REGIÓN DE MURCIA

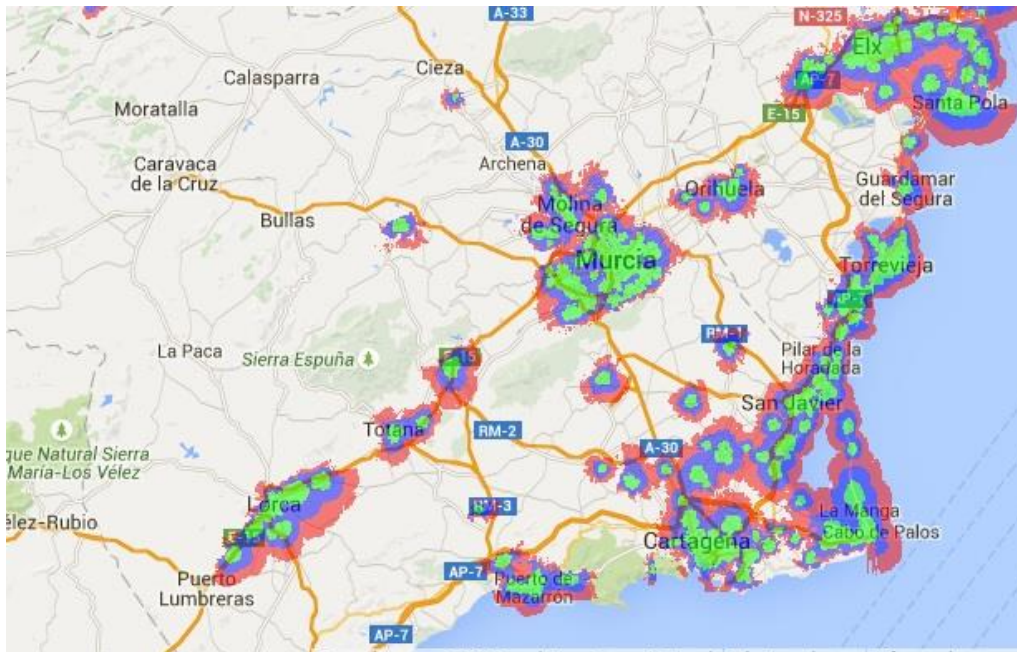
Según datos de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, la Región de Murcia es una Comunidad de gran interés para las compañías operadoras en cuanto a la explotación de servicios de telefonía. En relación a esto, en la Figura 3.4 se muestra el número de estaciones base de LTE desplegadas por Comunidades Autónomas.



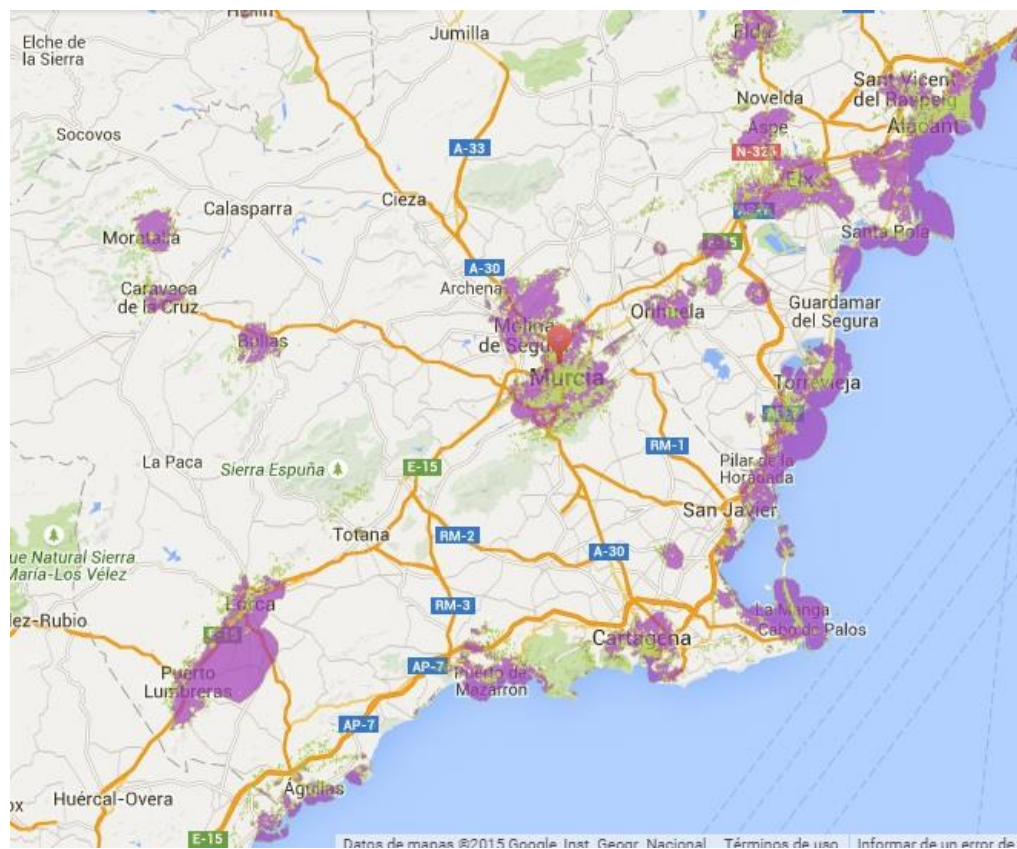
**Figura 3.4. Número de eNodesB en cada Comunidad Autónoma. [19]**

Ese dato de 121 eNodesB es un valor global, sin concretar el proveedor que los soporta. Por eso, mostraremos a continuación la cobertura proporcionada por las tres principales compañías que ofrecen servicio 4G LTE en el país. En primer lugar, será Vodafone el que nos mostrará sus principales núcleos de emisión a través de la Figura 3.5. Tres niveles de colores definen la intensidad, siendo verde señal muy alta, azul alta y rojo calidad baja. Otra compañía de interés es Movistar, cuyo radio de acción aparece en la Figura 3.6. Esta sólo indica intensidad alta a través del color verde y calidad baja por medio del color violeta. Finalmente, la representación dada en la Figura 3.7 viene suministrada por la francesa Orange.





**Figura 3.5. Cobertura LTE en la Región de Murcia proporcionada por la compañía Vodafone [20]**



**Figura 3.6. Cobertura LTE en la Región de Murcia proporcionada por la compañía Movistar [21]**



**Figura 3.7. Cobertura LTE en la Región de Murcia proporcionada por la compañía Orange [22]**

Analizando las tres figuras anteriores, se comprueba que la que mayor superficie de servicio abarca en nuestra región es Orange. Si bien esto es así, la calidad y velocidad ofrecida por cada una puede diferir mucho, incluso si considerásemos una buena zona de cobertura común para todas.

## 4. ESTUDIO DEL TRÁFICO DEMANDADO POR LOS USUARIOS DEL SISTEMA LTE

En este apartado vamos a realizar una comparativa de diferentes casos para llegar a una estimación contrastada de los requerimientos de los usuarios actuales. Por un lado tendremos el caso A, en el que se considera un alto uso de servicio de streaming de vídeo y también de videollamadas. En segundo lugar, la configuración de la opción B modela un funcionamiento menos intenso de los servicios antes comentados para ver así el impacto en el consumo de tráfico. En último lugar, tenemos una opción intermedia entre las dos anteriores.

Además, el estudio entre los casos mencionados se lleva a cabo en dos fuentes de información diferentes, para precisar en mayor medida el resultado. Las fuentes tomadas para el estudio son la empresa americana Verizon y la británica Vodafone.

En primer lugar, se muestra en la Figura 4.1 la estimación dada por Verizon para la configuración dispuesta para el caso A. Esta fuente nos ofrece un uso medio total de datos mensual considerando tanto 3G como 4G. En la Tabla 4.1 se expone con más detalle el resultado de la Figura 23.

TAREA	CANTIDAD	CONSUMO MENSUAL
E-mails con sólo texto	5 al día	1,46 MB
Número de webs visitadas	25 al día	292,97 MB
Streaming de audio	1 hora al día	1,86 GB
Descarga de canciones	15 al mes	
Streaming de vídeo sobre 3G	10 minutos al día	3,05 GB
Streaming de vídeo de Verizon y de la NFL sobre 3G	2 minutos al día	
Streaming de vídeo sobre 4G	10 minutos al día	
Subida y descarga de fotos	10 al día	900 MB
Videollamada con un ancho de banda medio	5 minutos al día	2,93 GB
Videollamada con un ancho de banda alto	5 minutos al día	
Consumo extra de navegación	30 minutos al día	75 MB
<b>TOTAL:</b>		<b>9,08 GB</b>

Tabla 4.1. Volumen de datos requerido según la configuración dispuesta para el caso A [23]

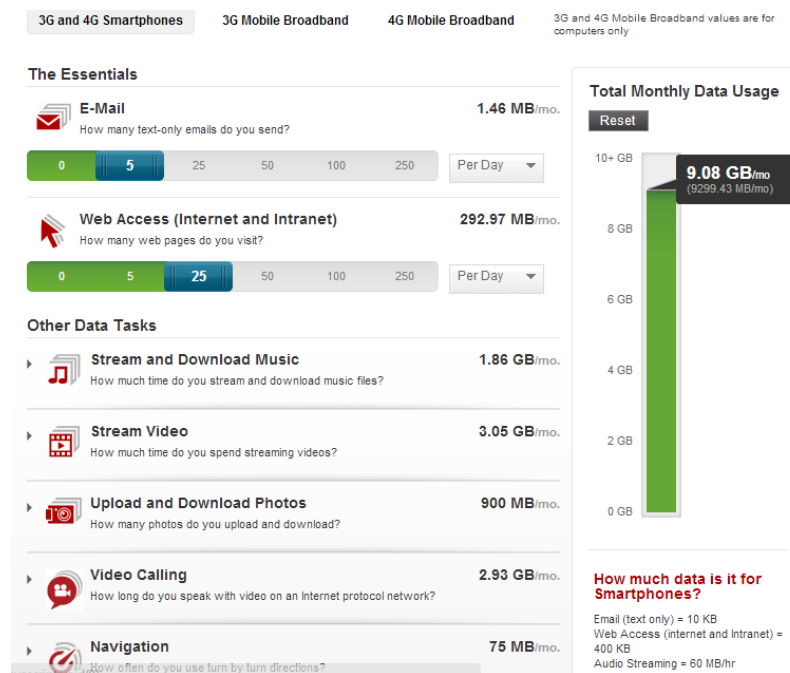


Figura 4.1. Configuración en Verizon para el caso A [23]

Ahora vamos con el segundo caso, donde considerábamos un usuario medio con menores exigencias. Este modelo B también está basado en la estimación de Verizon, y su configuración es la expuesta en la Tabla 4.2. En la Figura 4.2 de nuevo vemos la ventana de parametrización ofrecida por la compañía.

TAREA	CANTIDAD	CONSUMO MENSUAL
E-mails con sólo texto	5 al día	1,46 MB
Número de webs visitadas	25 al día	292,97 MB
Streaming de audio	15 minutos al día	485 MB
Descarga de canciones	5 al mes	
Streaming de vídeo sobre 3G	2 minutos al día	2,08 GB
Streaming de vídeo de Verizon y de la NFL sobre 3G	2 minutos al día	
Streaming de vídeo sobre 4G	10 minutos al día	
Subida y descarga de fotos	10 al día	900 MB
Videollamada con un ancho de banda medio	15 minutos al día	3,52 GB
Videollamada con un ancho de banda alto	0 minutos al día	
Consumo extra de navegación	30 minutos al día	75 MB
<b>TOTAL:</b>		<b>7,3 GB</b>

Tabla 4.2. Volumen de datos requerido según la configuración dispuesta para el caso B [23]



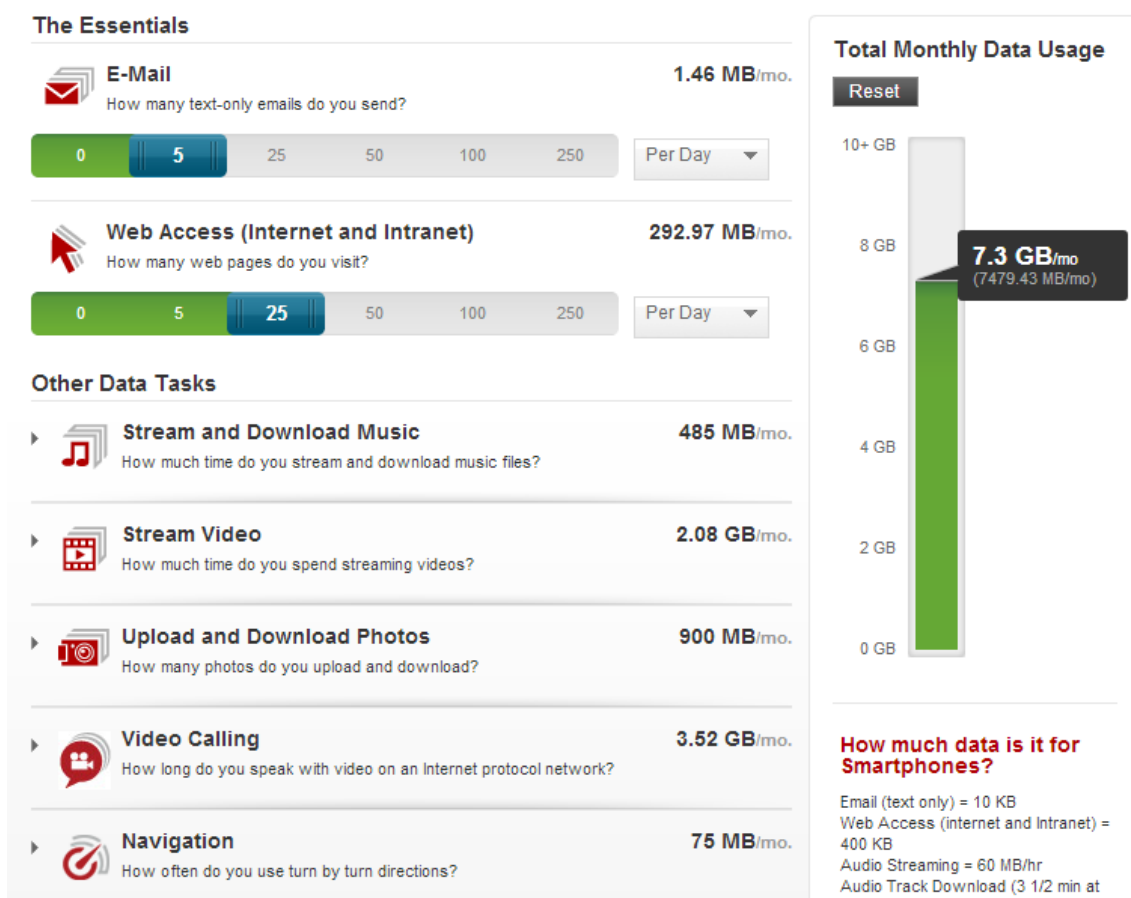


Figura 4.2. Configuración en Verizon para el caso B [23]

Con las reducciones de *streaming* y vídeo aplicadas en el caso B, conseguimos bajar hasta los 7,3 Gbytes, en comparación con los 9,08 Gbytes del primer caso. Aunque estas expectativas puedan parecer desproporcionadas en relación a las tarifas de datos ofrecidas por los distintos operadores hoy en día, en un futuro cercano es más que posible que este consumo sea algo usual. La tecnología 4G fue contemplada para gestionar altas tasas de bits y así ofrecer buen servicio de streaming y de vídeollamadas, que son las que mayor volumen ocupan en el estudio realizado. Suponemos que conforme vayan teniendo acceso todos los usuarios a las redes 4G, este consumo aumentará, debido a los nuevos comportamientos que se irán adoptando.

Por último, tenemos el caso del usuario cuya demanda será intermedia a las dos anteriores. En este caso, la empresa que nos dará los datos demandados será Vodafone. En la Tabla 4.3 tenemos la relación de entradas y consumo, lo que también puede ser observado en la Figura 4.3.

TAREA	CANTIDAD	CONSUMO MENSUAL
E-mails con sólo texto	20 a la semana	4 MB
E-mails con imágenes	10 a la semana	48,7 MB
Número de webs visitadas	50 a la semana	112,54 MB
Streaming de audio	1 hora a la semana	362 MB
Descarga de canciones	1 a la semana	
Streaming de vídeos o TV	30 minutos a la semana	4,46 GB
Skype sin vídeo	10 minutos a la semana	3,67 GB
Skype con vídeo	30 minutos a la semana	
Subida de fotos	20 a la semana	240 MB
<b>TOTAL:</b>		<b>8,9 GB</b>

Tabla 4.3. Volumen de datos requerido según la configuración dispuesta para el caso C [24]

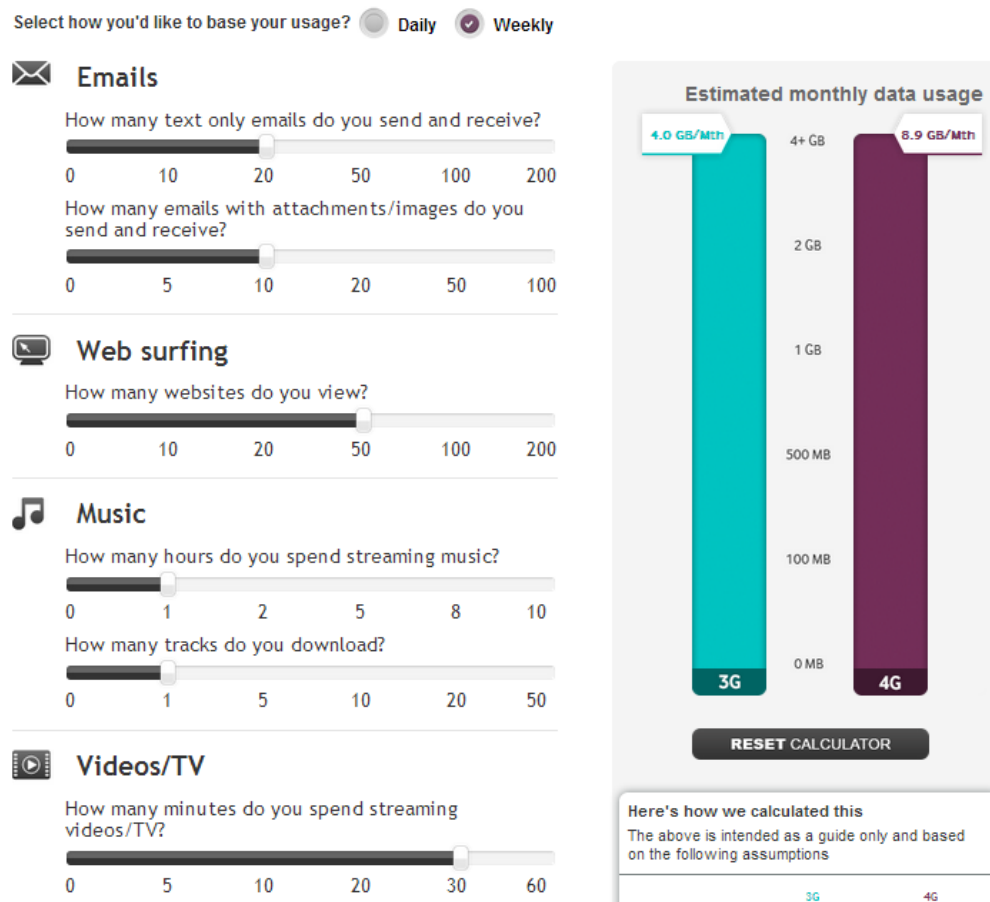


Figura 4.3. Configuración en Vodafone para el caso C [24]

#### *Apartado 4 – Estudio tráfico demandado por usuarios.*

En este último análisis, considerando que cursamos tráfico 4G para todos los servicios definidos, obtenemos un total de 8,9 Gbytes. Dado que el valor final obtenido para los tres casos es elevado, elegiremos el que nos ha resultado un volumen menor (opción B). Las prestaciones dadas por este plan son aceptables para nuestra planificación y conseguimos no excedernos tanto en nuestras pretensiones, por lo que es más viable su aplicación. A la hora de la obtención del número de eNodosB, consideraremos un tráfico ofrecido de 7 Gbytes por usuario al mes.

## 5. ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE UN eNODO-B TÍPICO DE ENTORNO RURAL Y URBANO

En este apartado llevamos a cabo un estudio sobre las tasas de bit que ofrece un eNodoB en el enlace descendente, considerando para ello los diferentes anchos de banda empleados en LTE. Además, habrá que tener en cuenta los bloques de recurso disponibles en cada caso, así como distintos aspectos que limitarán las tasas brutas como el CQI, overhead y eficiencia espectral.

Primeramente, un 10 % del ancho de banda es utilizado como banda de guarda para todos los casos excepto en el de 1,4 MHz. En segunda instancia, tenemos dos aspectos que también mermarán la capacidad final, como son el overhead y el indicador de calidad CQI.

En cuanto al overhead, tal y como se expone en [1], es necesario para gestionar información relativa a la señalización y control. La sobrecarga producida por este varía en función del canal, ancho de banda y técnica MIMO empleada, según se describe a continuación:

- El Canal de Control de Enlace Físico Descendente (PDCCH) toma un símbolo de cada 14 símbolos, siendo esta la mínima asignación posible. La sobrecarga dada por este es en torno al 7,1 % ( $=1/14$ ).
- La proporción de símbolos empleados por las señales de referencia (RS) del enlace descendente dependen de la configuración de la antena. La transmisión sin MIMO utiliza 2 símbolos de cada 14 en cada tercera subportadora, 4 símbolos para una configuración MIMO 2x2 y 6 símbolos en el caso de MIMO 4x4. La sobrecarga varía, por tanto, entre 4,8 % y 14,3 %, aunque esta se solapa de manera parcial con la del PDCCH.
- También se consideran otros símbolos destinados a señales de sincronización, PBCH, PCFICH y el PHICH. La sobrecarga de estos depende del ancho de banda empleado, variando desde menos de un 1 % para 20 MHz hasta aproximadamente un 9 % para 1,4 MHz.
- El PUCCH no es incluido en el cálculo, ya que influye negativamente en la tasa de datos del enlace ascendente.

De acuerdo a estas características y a las tasas de bits del enlace descendente que encontramos en [1], aplicaremos un 11 % de overhead al cálculo de las velocidades de transmisión.

En caso de tener un enlace donde hay una notable presencia de interferencia o ruido, la tasa neta se verá disminuida, ya que disminuirá la tasa de bits por símbolo, para que la comunicación contenga un menor número de errores. De este modo, a través del CQI se determina la máxima modulación y tasa de código posibles según la calidad de la señal que le llega al equipo de usuario. Además, hay dos indicadores adicionales relacionados con la calidad de la conexión LTE que completan la información del estado del canal (Channel State Information, CSI): el indicador de matriz de precodificación (Precoding Matrix Indicator, PMI) y el indicador de rango (Range Indicator, RI).

El indicador PMI hace referencia a la matriz que define el mapeo de cada uno de los flujos de datos o capas por antena. En base a la selección de matriz, se podrá maximizar la cantidad de bits de datos que el UE puede recibir. Cuando el UE conoce las matrices admisibles, envía un informe PMI a la estación base proponiendo una matriz apropiada. En otras palabras, por medio del informe PMI, el equipo de usuario puede proponer a la estación base una matriz de precodificación para el enlace descendente, que alcance el caudal de datos máximo para el estado de canal dado [25].

El segundo indicador, RI, indica la cantidad de capas y flujos de señales diferentes que son transmitidas en enlace descendente. El objetivo de este es maximizar la capacidad del canal sobre el total del ancho de banda disponible en función del rango correspondiente.

Estos tres indicadores del CSI están, por tanto, interconectados, de manera que la variación de uno afecta a los otros. Sin embargo, la estación base sólo puede utilizar el informe CQI para adaptar el canal de enlace descendente. De este modo, este indicador será el único que influya en nuestros cálculos de tasas de bits netas, basándonos en los valores anteriormente mostrados en la Tabla 2.4. Esta tabla nos proporciona la eficiencia de bit por símbolo, en función del valor de CQI que tendremos en la comunicación.

Asimismo, comenzamos nuestro análisis obteniendo la velocidad máxima de transferencia bruta para cada ancho de banda en el enlace descendente, considerando las 3 modulaciones posibles (QPSK, 16-QAM, 64-QAM) y las 3 configuraciones de MIMO disponibles (sin MIMO, MIMO 2x2, MIMO 4x4). Antes de nada, habrá que prescindir del 10 % de recursos que no serán utilizados en concepto de banda de guarda, por lo que nos quedan los anchos de banda efectivos descritos en la Tabla 5.1:

ANCHO DE BANDA TOTAL (MHz)	ANCHO DE BANDA ÚTIL (MHz)
1,4	1,4 (No varía)
3	2,7
5	4,5
10	9
15	13,5
20	18

**Tabla 5.1. Comparación de BW total frente al útil.**

Con este dato podemos conocer el número de bloques de recurso disponibles en cada caso, dividiendo el ancho de banda útil entre la cantidad de espectro ocupado por un bloque de recurso (180 kHz), tal y como figura en la Tabla 5.2:

ANCHO DE BANDA ÚTIL (MHz)	BLOQUES DE RECURSO DISPONIBLES
1,4	6
2,7	15
4,5	25
9	50
13,5	75
18	100

**Tabla 5.2. Cantidad de bloques de recurso asignados a cada BW.**

El número de símbolos por segundo empleados en cada caso viene dado por el producto de cuatro valores: el número de bloques de recurso (diferente en cada opción), el número de subportadoras por bloque de recurso (12), el número de símbolos OFDM por slot (7) y la cantidad de slots por unidad de tiempo (dos slots en 1 ms).

Además, la utilización de MIMO en el enlace la tendremos en cuenta a través de la eficiencia dada por el tipo de MIMO empleado: 1,74 en MIMO 2x2 y 3,26 en MIMO 4x4 [1].

Finalmente, el bit rate neto lo obtenemos como resultado del producto de la eficiencia de bit/símbolo calculada, del número de símbolos por segundo y del porcentaje de ancho de banda útil que nos queda tras considerar el overhead (89 %) [1]. Se mostrarán a continuación los cálculos de los 3 casos para los que se ha realizado la simulación en el software de RadioGIS: QPSK con MIMO 2x2, 16-QAM con MIMO 2x2 y 64-QAM sin MIMO. Para el primero utilizaremos un CQI de 6, en el segundo caso un CQI de 8 y para el último el CQI tendrá un valor de 13.

#### **QPSK con MIMO 2x2, BW=20 MHz, CQI=6**

Al emplear 20 MHz tendremos 100 bloques de recurso disponibles, mientras que un CQI de 6 otorga una tasa de código de 0,5879 según la Tabla 2.4.

#### Número de símbolos por segundo

$$\begin{aligned} \rightarrow & 100 \text{ BR} \times 12 \text{ (subportadoras/BR)} \times 7 \text{ (símbolos/(slot} \times \text{ subportadora))} \times 2 \text{ (slots/ms)} = \\ & = \mathbf{16,8 \text{ Msímbolos/s}} \end{aligned}$$

#### Eficiencia de bit/símbolo

$$\begin{aligned} \rightarrow & 2 \text{ (bits/símb)} \times 0,5879 \text{ (tasa de código CQI)} \times 1,75 \text{ (eficiencia MIMO 2x2)} = \\ & = \mathbf{2,046 \text{ bits/símbolo}} \end{aligned}$$

## Apartado 5 – Estudio capacidad de eNodo B.

### Tasa de bit neta

$$\hookrightarrow 16,8 \text{ (Msímbolos/s)} \times 2,046 \text{ (bits/símbolo)} \times 0,89 \text{ (overhead)} = \boxed{30,59 \text{ Mbits/seg}}$$

### **16-QAM con MIMO 2x2, BW=20 MHz, CQI=8**

Ahora, un CQI de 8 posee una tasa de código de 0,4785.

### Número de símbolos por segundo

$$\hookrightarrow 100 \text{ BR} \times 12 \text{ (subportadoras/BR)} \times 7 \text{ (símbolos/(slot x subportadora))} \times 2 \text{ (slots/ms)} = \mathbf{16,8 \text{ Msímbolos/s}}$$

### Eficiencia de bit/símbolo

$$\hookrightarrow 4 \text{ (bits/símb)} \times 0,4785 \text{ (tasa de código CQI)} \times 1,75 \text{ (eficiencia MIMO 2x2)} = \mathbf{3,33 \text{ bits/símbolo}}$$

### Tasa bit neta

$$\hookrightarrow 16,8 \text{ (Msímbolos/s)} \times 3,33 \text{ (bits/símbolo)} \times 0,89 \text{ (overhead)} = \boxed{49,79 \text{ Mbits/seg}}$$

### **64-QAM sin MIMO, BW=10 MHz, CQI=13**

En este último caso, cambiamos el ancho de banda además de la modulación y del CQI. La tasa de código ahora es 0,6504 mientras que la eficiencia espectral, al no emplear MIMO, será la unidad.

### Número de símbolos por segundo

$$\hookrightarrow 50 \text{ BR} \times 12 \text{ (subportadoras/BR)} \times 7 \text{ (símbolos/(slot x subportadora))} \times 2 \text{ (slots/ms)} = \mathbf{8,40 \text{ Msímbolos/s}}$$

### Eficiencia de bit/símbolo

$$\hookrightarrow 6 \text{ (bits/símb)} \times 0,7539 \text{ (tasa de código CQI)} \times 1 \text{ (sin MIMO)} = \mathbf{4,52 \text{ bits/símbolo}}$$

### Tasa bit neta

$$\hookrightarrow 8,40 \text{ (Msímbolos/s)} \times 4,52 \text{ (bits/símbolo)} \times 0,89 \text{ (overhead)} = \boxed{33,81 \text{ Mbits/seg}}$$

A continuación, desde la Tabla 5.3 hasta la Tabla 5.11, se muestran los valores resultantes para todas las configuraciones de MIMO, para todos los CQI posibles y para las tres modulaciones de LTE.

MODULACIÓN		QPSK					
MIMO		SIN MIMO					
BITS/SÍMBOLO		2					
ANCHO DE BANDA ÚTIL		89 %					
CQI		1	2	3	4	5	6
TASA DE CÓDIGO		0,0762	0,1172	0,1885	0,3008	0,4385	0,5879
EFICIENCIA (BITS/SÍMBOLO)		0,1524	0,2344	0,377	0,6016	0,877	1,1758
BW/BR	1,4 MHz/6	0,1367	0,2103	0,3382	0,5397	0,7868	1,0548
	3 MHz/15	0,3418	0,5257	0,8455	1,3493	1,9669	2,6371
	5 MHz/25	0,5697	0,8762	1,4092	2,2488	3,2782	4,3951
	10 MHz/50	1,1393	1,7524	2,8185	4,4976	6,5565	8,7903
	15 MHz/75	1,7090	2,6286	4,2277	6,7463	9,8347	13,1854
	20 MHz/100	2,2787	3,5047	5,6369	8,9951	13,1129	17,5806

**Tabla 5.3. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de QPSK, sin MIMO.**

MODULACIÓN		QPSK					
MIMO		2 x 2					
BITS/SÍMBOLO		2					
ANCHO DE BANDA ÚTIL		89 %					
CQI		1	2	3	4	5	6
TASA DE CÓDIGO		0,0762	0,1172	0,1885	0,3008	0,4385	0,5879
EFICIENCIA (BITS/SÍMBOLO)		0,265176	0,407856	0,65598	1,046784	1,52598	2,045892
BW/BR	1,4 MHz/6	0,2379	0,3659	0,5885	0,9391	1,3690	1,8354
	3 MHz/15	0,5947	0,9147	1,4712	2,3477	3,4225	4,5885
	5 MHz/25	0,9912	1,5246	2,4521	3,9129	5,7041	7,6475



	10 MHz/50	1,9825	3,0491	4,9041	7,8258	11,4082	15,2951
	15 MHz/75	2,9737	4,5737	7,3562	11,7386	17,1123	22,9426
	20 MHz/100	3,9649	6,0983	9,8082	15,6515	22,8165	30,5902

**Tabla 5.4. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de QPSK, con MIMO 2 x 2.**

MODULACIÓN		QPSK					
MIMO		4 x 4					
BITS/SÍMBOLO		2					
ANCHO DE BANDA ÚTIL		89 %					
CQI		1	2	3	4	5	6
TASA DE CÓDIGO		0,0762	0,1172	0,1885	0,3008	0,4385	0,5879
EFICIENCIA (BITS/SÍMBOLO)		0,496824	0,764144	1,22902	1,961216	2,85902	3,833108
BW/BR	1,4 MHz/6	0,4457	0,6855	1,1026	1,7594	2,5649	3,4388
	3 MHz/15	1,1143	1,7138	2,7564	4,3986	6,4122	8,5969
	5 MHz/25	1,8571	2,8564	4,5941	7,3310	10,6870	14,3282
	10 MHz/50	3,7143	5,7127	9,1882	14,6621	21,3740	28,6563
	15 MHz/75	5,5714	8,5691	13,7822	21,9931	32,0611	42,9845
	20 MHz/100	7,4285	11,4255	18,3763	29,3241	42,7481	57,3126

**Tabla 5.5. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de QPSK, con MIMO 4 x 4.**

MODULACIÓN		16-QAM		
MIMO		Sin MIMO		
BITS/SÍMBOLO		4		
ANCHO DE BANDA ÚTIL		89 %		
CQI		7	8	9
TASA DE CÓDIGO		0,3691	0,4785	0,6016
EFICIENCIA (BITS/SÍMBOLO)		1,4764	1,914	2,4064
BW/BR	1,4 MHz/6	1,3245	1,7171	2,1588
	3 MHz/15	3,3113	4,2927	5,3971
	5 MHz/25	5,5188	7,1545	8,9951
	10 MHz/50	11,0376	14,3091	17,9902
	15 MHz/75	16,5563	21,4636	26,9854
	20 MHz/100	22,0751	28,6181	35,9805

Tabla 5.6. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 16-QAM, sin MIMO.

MODULACIÓN		16-QAM		
MIMO		MIMO 2 x 2		
BITS/SÍMBOLO		4		
ANCHO DE BANDA ÚTIL		89 %		
CQI		7	8	9
TASA DE CÓDIGO		0,3691	0,4785	0,6016
EFICIENCIA (BITS/SÍMBOLO)		2,568936	3,33036	4,187136
BW/BR	1,4 MHz/6	2,3046	2,9877	3,7564

	3 MHz/15	5,7616	7,4693	9,3909
	5 MHz/25	9,6027	12,4489	15,6515
	10 MHz/50	19,2054	24,8978	31,3030
	15 MHz/75	28,8080	37,3467	46,9545
	20 MHz/100	38,4107	49,7955	62,6061

**Tabla 5.7. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 16-QAM, con MIMO 2 x 2.**

MODULACIÓN		16-QAM		
MIMO		MIMO 4 x 4		
BITS/SÍMBOLO		4		
ANCHO DE BANDA ÚTIL		89 %		
CQI		7	8	9
TASA DE CÓDIGO		0,3691	0,4785	0,6016
EFICIENCIA (BITS/SÍMBOLO)		4,813064	6,23964	7,844864
BW/BR	1,4 MHz/6	4,3179	5,5977	7,0378
	3 MHz/15	10,7947	13,9943	17,5945
	5 MHz/25	17,9912	23,3238	29,3241
	10 MHz/50	35,9825	46,6475	58,6482
	15 MHz/75	53,9737	69,9713	87,9723
	20 MHz/100	71,9649	93,2951	117,2964

**Tabla 5.8. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 16-QAM, con MIMO 4 x 4.**

MODULACIÓN		64-QAM					
MIMO		Sin MIMO					
BITS/SÍMBOLO		6					
ANCHO DE BANDA ÚTIL		89 %					
CQI		10	11	12	13	14	15
TASA DE CÓDIGO		0,4551	0,5537	0,6504	0,7539	0,8525	0,9258
EFICIENCIA (BITS/SÍMBOLO)		2,7306	3,3222	3,9024	4,5234	5,115	5,5548
BW/BR	1,4 MHz/6	2,4497	2,9804	3,5009	4,0580	4,5888	4,9833
	3 MHz/15	6,1242	7,4510	8,7523	10,1451	11,4719	12,4583
	5 MHz/25	10,2070	12,4184	14,5872	16,9085	19,1199	20,7638
	10 MHz/50	20,4140	24,8368	29,1743	33,8169	38,2397	41,5277
	15 MHz/75	30,6209	37,2552	43,7615	50,7254	57,3596	62,2915
	20 MHz/100	40,8279	49,6735	58,3487	67,6339	76,4795	83,0554

Tabla 5.9. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 64-QAM, sin MIMO.

MODULACIÓN		64-QAM					
MIMO		MIMO 2 x 2					
BITS/SÍMBOLO		6					
ANCHO DE BANDA ÚTIL		89 %					
CQI		10	11	12	13	14	15
TASA DE CÓDIGO		0,4551	0,5537	0,6504	0,7539	0,8525	0,9258
EFICIENCIA (BITS/SÍMBOLO)		4,751244	5,780628	6,790176	7,870716	8,9001	9,665352
BW/BR	1,4 MHz/6	4,2624	5,1859	6,0916	7,0610	7,9845	8,6710
	3 MHz/15	10,6561	12,9648	15,2290	17,6524	19,9611	21,6775
	5 MHz/25	17,7602	21,6080	25,3817	29,4207	33,2686	36,1291

	10 MHz/50	35,5203	43,2160	50,7634	58,8415	66,5371	72,2582
	15 MHz/75	53,2805	64,8240	76,1450	88,2622	99,8057	108,3873
	20 MHz/100	71,0406	86,4319	101,5267	117,6829	133,0743	144,5163

**Tabla 5.10. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 64-QAM, con MIMO 2 x 2.**

MODULACIÓN		64-QAM					
MIMO		MIMO 4 x 4					
BITS/SÍMBOLO		6					
ANCHO DE BANDA ÚTIL		89 %					
CQI		10	11	12	13	14	15
TASA DE CÓDIGO		0,4551	0,5537	0,6504	0,7539	0,8525	0,9258
EFICIENCIA (BITS/SÍMBOLO)		8,901756	10,830372	12,721824	14,746284	16,6749	18,108648
BW/BR	1,4 MHz/6	7,9859	9,7161	11,4130	13,2292	14,9594	15,5155
	3 MHz/15	19,9649	24,2904	28,5325	33,0730	37,3985	40,6141
	5 MHz/25	33,2748	40,4839	47,5542	55,1216	62,3308	67,6901
	10 MHz/50	66,5495	80,9679	95,1084	110,2432	124,6616	135,3803
	15 MHz/75	99,8243	121,4518	142,6625	165,3648	186,9923	203,0704
	20 MHz/100	133,0991	161,9357	190,2167	220,4864	249,3231	270,7605

**Tabla 5.11. Tasas de bits netas en Mbps para todos los CQI de 64-QAM, con MIMO 4 x 4.**

## 6. BALANCE DE ENLACES

Es necesario el estudio del balance de los enlaces para determinar las pérdidas máximas que nos será posible asumir en nuestro análisis. Con esta información podremos determinar el radio máximo que tendrán las celdas del sistema, y seguidamente, el número de estaciones base que necesitaremos desplegar para cubrir toda la zona prevista.

En este apartado, consideramos tanto el enlace ascendente como el descendente para diferentes anchos de banda. Consideraremos el mismo balance para las dos frecuencias de interés, 800 MHz y 1800 MHz, puesto que la menor ganancia de las antenas a 800 MHz se compensa con menores pérdidas presentes en los modelos de propagación de entorno rural. El balance en el enlace descendente de LTE posee varias similitudes respecto al de HSPA, mientras que el enlace ascendente presenta algunas diferencias: menor margen de interferencia en LTE, sin ganancia por diversidad y sin margen de desvanecimiento rápido [1].

En primer lugar, obtenemos las máximas pérdidas admisibles a través del uso de un ancho de banda de 360 kHz, equivalente a dos bloques de recurso, y una tasa de 64 kbps, tal y como se expone en [1]. En la Tabla 6.1 se aprecian los parámetros empleados en los cálculos.

ENLACE ASCENDENTE PARA TECNOLOGÍA LTE	
TRANSMISOR (UE)	
POTENCIA TRANSMISIÓN (dBm) – $P_{TX}$	23
GANANCIA ANTENA TRANSMISIÓN (dBi) - $G_{TX}$	0
PÉRDIDAS POR CUERPO (dB) - $L_{BODY}$	3
PIRE (dBm)	20
RECEPTOR (eNodoB)	
FIGURA DE RUIDO eNodo B (dB) - $N_F$	2
RUIDO TÉRMICO (dBm) - $N_T$	-118,41
RUIDO EN EL RECEPTOR (dBm) - $N_R$	-116,41
SINR (dB)	-7
SENSIBILIDAD (dBm) - $S$	-123,41
MARGEN DE INTERFERENCIA (dB)	1
PÉRDIDAS CABLE (dB)	2
GANANCIA ANTENA RECEPCIÓN (dBi)	17
MARGEN POR DESVANECIMIENTO RÁPIDO (dB)	0
GANANCIA POR SOFT HANDOVER (dB)	0
PÉRDIDAS MÁXIMAS ADMISIBLES (dB)	159,41

Tabla 6.1. Balance de enlace ascendente para el caso de BW = 360 kHz [1].

## Apartado 6 – Balance de enlaces.

El parámetro de potencia de transmisión empleado es un valor típico, máximo para la clase de potencia número 3. La ganancia de la antena transmisora depende de diferentes aspectos como el tipo de dispositivo o la banda de frecuencia empleada, y en nuestro caso tendrá un valor de 0 dBi. Con el valor usual de 3 dB para las pérdidas por cuerpo, obtenemos la Potencia Isótropa Radiada Equivalente (PIRE) de la siguiente manera:

$$PIRE (dBm) = P_{tx} (dBm) + G_{tx} (dB) - L_{body} (dB)$$

### Ecuación 1

El valor de la figura de ruido en la estación base depende del diseño de la red, y en nuestro caso consideramos 2 dB. La atribución de ruido térmico estará ligada al ancho de banda empleado, así como a la temperatura y a la constante de Boltzmann según la Ecuación 2:

$$N_t (dBm) = 30 + 10 \cdot \log_{10} \left[ k \left( \frac{J}{K} \right) \cdot T^a (K) \cdot BW_{\text{útil}} (Hz) \right]$$

### Ecuación 2

Asimismo, el ruido en el receptor será obtenido haciendo uso de los dos últimos coeficientes.

$$N_r (dBm) = N_t (dBm) + N_F (dB)$$

### Ecuación 3

En el caso de la relación de señal a ruido e interferencia (SINR), esta depende de la tasa de datos y del número de bloques de recurso asignados, y en nuestro caso valdrá -7 dB [1]. La SINR objetivo que se desea alcanzar permite hallar la sensibilidad mediante la Ecuación 4:

$$S (dBm) = SINR (dB) + N_r (dBm)$$

### Ecuación 4

El margen de interferencia en LTE podrá ser menor que en HSPA, ya que al ser ortogonal no habrá interferencias dentro de una misma celda. Aun así consideraremos 1 dB para posibles interferencias de otras celdas. También consideraremos unas pérdidas de 2 dB para recepción y una ganancia de la antena de 17 dB para 1800 MHz, la cual tendrá menor ganancia para 800 MHz. En tercera generación se hace uso del acceso WCDMA, el cual requiere de un control de potencia para ambos enlaces. Sin embargo, el uso de OFDMA en LTE conlleva la ausencia de este control rápido de potencia, por lo que no necesitaremos emplear un margen de desvanecimiento rápido, así como tampoco tendrá consideración el soft handover que sí se utiliza en HSPA.

Del mismo modo, en la Tabla 6.2 tenemos el balance pero, en este caso, para el enlace descendente.

ENLACE DESCENDENTE PARA TECNOLOGÍA LTE	
TRANSMISOR (eNodoB)	
POTENCIA MÁX. TX (dBm) - $P_{TX}$	46
GANANCIA ANTENA TX (dBi) - $G_{TX}$	17
PÉRDIDAS CABLE (dB) - $L_C$	2
PIRE (dBm)	61
RECEPTOR (UE)	
FIGURA RUIDO UE (dB) - $N_F$	7
RUIDO TÉRMICO (dB) - $N_T$	-118,41
RUIDO EN RECEPCIÓN (dBm)	-111,41
SINR (dB)	-9
SENSIBILIDAD (dBm)	-120,41
MARGEN DE INTERFERENCIA (dB) - $M_I$	5,5
PÉRDIDAS POR CUERPO (dB)	3
GANANCIA ANTENA RX (dBi)	0
OVERHEAD DEL CANAL DE CONTROL (11 %)	0,4
PÉRDIDAS MÁXIMAS ADMISIBLES (dB)	183,51

**Tabla 6.2. Balance de enlace descendente para el caso de BW = 10 MHz [1].**

La potencia típica empleada una macro celda suele oscilar entre 43 y 48 dBm, en nuestro caso emplearemos 46 dBm. La ganancia y las pérdidas por cables de transmisión tendrán valor similar a las que tenían en recepción en el anterior balance. La PIRE vendrá dada por Ecuación 5:

$$PIRE \text{ (dBm)} = P_{tx} \text{ (dBm)} + G_{tx} \text{ (dB)} - L_c \text{ (dB)}$$

#### Ecuación 5

La figura de ruido del terminal móvil será mayor que la de la estación base, considerando para este balance un valor de 7 dB. La potencia de ruido térmico será hallada del mismo modo que para enlace ascendente, sólo que en este caso consideramos un ancho de banda útil de 9 MHz, con 50 bloques de recurso. De nuevo, el ruido en recepción resulta de la suma de los dos anteriores. Para el caso del SINR, al emplear ahora un mayor número de bloques de recurso tendremos mayor influencia negativa, y tendremos un valor de -9 dB. Para calcular la sensibilidad se aplicaría la misma fórmula que en el caso anterior, resultando -120,41 dBm. En el margen de interferencia tenemos en cuenta la influencia de ruido causada por las células adyacentes, donde asumimos una distribución del SINR medio del canal (factor geométrico o factor G) de -4 dB.



$$M_I \text{ (dB)} = 10 \cdot \log_{10} \left[ 1 + 10^{(-G_{factor}/10)} \right]$$

### Ecuación 6

Las pérdidas por cuerpo y la ganancia en recepción se corresponden con las indicadas en transmisión en el balance de la Tabla 6.1. Por último, al emplear un overhead del 11 % en nuestro trabajo, este repercutirá con 0,4 dB.

Si comparamos las pérdidas máximas admisibles obtenidas en las Tablas 6.1 y 6.2 apreciamos que serán más desfavorables en el caso ascendente, teniendo un ancho de banda menor. Vamos a considerar en la Tabla 6.3 una variación del enlace ascendente en el que emplearemos el mismo ancho de banda que en la Tabla 6.2, 10 MHz.

ENLACE ASCENDENTE PARA TECNOLOGÍA LTE	
TRANSMISOR (UE)	
POTENCIA TRANSMISIÓN (dBm) – P <sub>TX</sub>	23
GANANCIA ANTENA TRANSMISIÓN (dBi) - G <sub>TX</sub>	0
PÉRDIDAS POR CUERPO (dB) - L <sub>BODY</sub>	3
PIRE (dBm)	20
RECEPTOR (eNodeB)	
FIGURA DE RUIDO eNode B (dB) - N <sub>F</sub>	2
RUIDO TÉRMICO (dBm) - N <sub>T</sub>	-104,43
RUIDO EN EL RECEPTOR (dBm) - N <sub>R</sub>	-102,43
SINR (dB)	-9
SENSIBILIDAD (dBm) - S	-111,43
MARGEN DE INTERFERENCIA (dB)	1
PÉRDIDAS CABLE (dB)	2
GANANCIA ANTENA RECEPCIÓN (dBi)	17
MARGEN POR DESVANECIMIENTO RÁPIDO (dB)	0
GANANCIA POR SOFT HANDOVER (dB)	0
PÉRDIDAS MÁXIMAS ADMISIBLES (dB)	147,43

**Tabla 6.3. Balance de enlace ascendente para el caso de BW = 10 MHz [1].**

El nivel de ruido térmico disminuye en este caso debido al aumento de número de bloques de recurso, al igual que ocurre con la SINR por la misma razón. Esto genera un resultado más desfavorable que el de la Tabla 6.1, correspondiente también al enlace ascendente pero aquel con un ancho de banda menor (360 kHz). Por esto, este último enlace ascendente será el empleado en RadioGIS para estipular el número de estaciones base necesarias. El dato de las pérdidas máximas admisibles será empleado en el dimensionamiento basado en pérdidas

*Apartado 6 – Balance de enlaces.*

máximas que se presenta en el próximo apartado. Además, el valor de sensibilidad de la Tabla 6.3 será el empleado en los ajustes de recepción de RadioGIS para el cálculo de las distintas coberturas.

## 7. CÁLCULO DEL NÚMERO DE eNODOS-B EN LOS ENTORNOS ESTUDIADOS

En nuestra planificación utilizaremos eNodosB con sectorización triple, y realizaremos el cálculo para todos los posibles anchos de banda y valores de CQI. Así, obtendremos el número de eNodos-B en cada caso, tanto en el entorno urbano como en el rural, aplicando dos estrategias diferentes: según el tráfico que se debe cursar y según las pérdidas máximas que se pueden compensar en el balance del enlace. En el dimensionamiento por tráfico tenemos dos principios diferentes, ya que en primer lugar nos basaremos en volumen de tráfico ofrecido y en segundo lugar el planteamiento gira en torno a la tasa de datos del usuario.

Por otra parte, nuestro estudio estará basado en la compañía Vodafone. Según estadísticas de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) del año 2013 [26], en la Región de Murcia las cuotas de mercado en la telefonía móvil pospago se muestran en la Figura 7.1:



**Figura 7.1. Cuotas de mercado de 2013 según la CNMC [26]**

Sin embargo, no toda la población proporcional a ese 20,97 % tendrá contratado el servicio 4G. De este modo, consideraremos que en el entorno urbano el 10 % de los suscriptores de Vodafone dispondrá de este servicio mientras que será un 8 % el número de usuarios activos 4G en el entorno rural.

Finalmente, el Instituto Nacional de Estadística (INE) publicó en octubre del pasado año los resultados de una encuesta anual, respecto del año 2014, sobre equipamiento y uso de Tecnologías de Información y Comunicación en los hogares de toda España [27]. Según esta encuesta, el índice de población que utilizó conexión a internet móvil en ese año fue del 67,2 %. Este valor será el punto de partida de nuestra planificación para estimar el número de usuarios a los que tendremos que brindar servicio.

## 7.1. ENTORNO URBANO

La localización geográfica que será objeto de interés en este punto será la ciudad de Murcia. Si bien esta ocupa una enorme cantidad de superficie, nosotros nos centraremos concretamente en el área metropolitana de Murcia, la cual consta de 392.230 habitantes. Como señalábamos anteriormente, la penetración del teléfono inteligente en España llega hasta el 67,2 %, lo que indica que el número de usuarios que habrá que considerar en nuestra planificación será de 263.578.

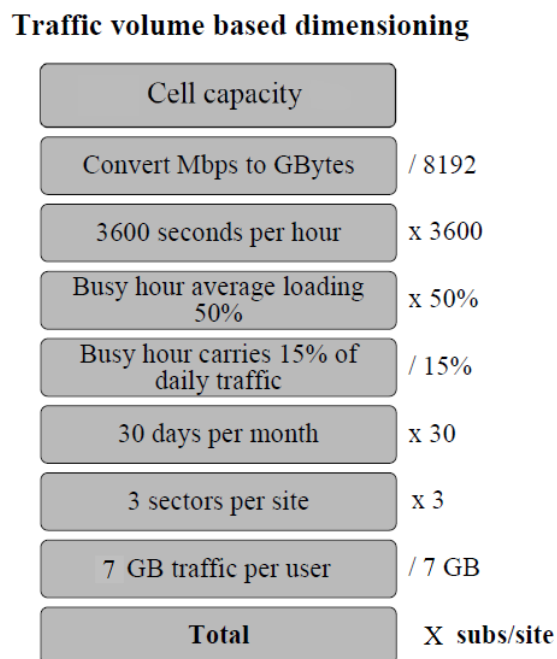
Por otro lado, debemos considerar únicamente la parte de estos usuarios que sean clientes de la compañía Vodafone. Si la cuota de mercado de esta en la Región de Murcia es de casi un 21 %, nos quedará un registro de 55.351 personas, de las cuales sólo tendremos en cuenta el 10 % que está dado de alta en el servicio de cuarta generación (LTE). Con esto, el número de usuarios final a los que se les debe otorgar cobertura es 5.535.

### 7.1.1. DIMENSIONAMIENTO DADO POR TRÁFICO

#### 7.1.1.1. DIMENSIONAMIENTO BASADO EN VOLUMEN DE TRÁFICO

Analizaremos el dimensionamiento basado en volumen de tráfico descrito en [1], en el cual se fija el consumo medio mensual que se le quiere servir a un usuario. En nuestro caso, hemos determinado una cantidad de 7 Gbytes, tal y como indicamos en el apartado 4.

Primeramente, tomaremos el valor de capacidad correspondiente que aparece en las Tablas 5.3-5.11 según la configuración que queramos analizar, y seguiremos los pasos indicados en la Figura 7.2.



**Figura 7.2. Procedimiento seguido para dimensionamiento basado en volumen de tráfico [1]**

## Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.

La carga de una célula va directamente relacionada con el CQI y, por tanto, con la SINR presente en el canal. De este modo, si la carga es alta, el valor de CQI será bajo y el nivel de interferencia o de ruido tenderá a aumentar. Así, estas variaciones terminan afectando negativamente tanto al radio de la célula como a la tasa de bit, por eso se trata de mantener una carga lo más baja posible aplicando la técnica *scheduling*.

De acuerdo a la Figura 7.2, en la hora pico se consume el 50 % de la capacidad de un sector. Asimismo, el tráfico diario se calcula a partir de esta carga en la hora pico, considerando para ello que la hora pico representa el 15 % del tráfico diario.

Vamos a aplicar estos cálculos a los dos primeros casos de ejemplo comenzados en el apartado 5, ya que son los que emplean el ancho de banda deseado para el entorno urbano (20 MHz).

### QPSK con MIMO 2x2, BW=20 MHz, CQI=6

En los cálculos realizados en el apartado 5, obteníamos una tasa de bit neta de 30,59 Megabits por segundo.

#### Conversión de Mbits/seg a Gbytes/seg

$$\hookrightarrow 30,59 \text{ (Mbits/seg)} / (1024 \times 8) = 30,59 \text{ (Mbits/seg)} / 8192 = \mathbf{0,0037 \text{ (Gbytes/seg)}}$$

#### Conversión de Gbytes/seg a Gbytes/hora

$$\hookrightarrow 0,0037 \text{ (Gbytes/seg)} \times 3600 = \mathbf{13,443 \text{ (Gbytes/hora)}}$$

#### Carga en hora pico

$$\hookrightarrow 13,443 \text{ (Gbytes/hora)} \times 0,5 = \mathbf{6,721 \text{ (Gbytes/hora pico)}}$$

#### Carga diaria dada por hora pico

$$\hookrightarrow 6,721 \text{ (Gbytes/hora pico)} / 0,15 = \mathbf{44,809 \text{ (Gbytes/día)}}$$

#### Volumen mensual por célula

$$\hookrightarrow 44,809 \text{ (Gbytes/día)} \times 30 = \mathbf{1344,294 \text{ (Gbytes/mes/célula)}}$$

#### Volumen mensual por emplazamiento

$$\hookrightarrow 1344,294 \text{ (Gbytes/mes/célula)} \times 3 \text{ (célula/emplazamiento)} = \mathbf{4032,884 \text{ (Gbytes/mes/emplazamiento)}}$$

### *Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

#### Número de personas servidas por emplazamiento

$$\begin{aligned} \hookrightarrow & 4032,884 \text{ (Gbytes/mes/emplazamiento)} / 7 \text{ (Gbytes/mes/usuario)} = \\ & = \mathbf{576 \text{ (usuarios/emplazamiento)}} \end{aligned}$$

#### Nº eNodos B necesarios

$$\hookrightarrow 5.535 \text{ (usuarios)} / 576 \text{ (usuarios/emplazamiento)} = \mathbf{10 \text{ (eNodos B)}}$$

#### **16-QAM con MIMO 2x2, BW=20 MHz, CQI=8**

En los cálculos realizados anteriormente teníamos una tasa de bit neta de 49,79 Megabits por segundo.

#### Conversión de Mbts/seg a Gbytes/seg

$$\hookrightarrow 49,79 \text{ (Mbts/seg)} / (1024 \times 8) = 49,79 \text{ (Mbts/seg)} / 8192 = \mathbf{0,00607 \text{ (Gbytes/seg)}}$$

#### Conversión de Gbytes/seg a Gbytes/hora

$$\hookrightarrow 0,00607 \text{ (Gbytes/seg)} \times 3600 = \mathbf{21,882 \text{ (Gbytes/hora)}}$$

#### Carga en hora pico

$$\hookrightarrow 21,882 \text{ (Gbytes/hora)} \times 0,5 = \mathbf{10,941 \text{ (Gbytes/hora pico)}}$$

#### Carga diaria dada por hora pico

$$\hookrightarrow 10,941 \text{ (Gbytes/hora pico)} / 0,15 = \mathbf{72,942 \text{ (Gbytes/día)}}$$

#### Volumen mensual por célula

$$\hookrightarrow 72,942 \text{ (Gbytes/día)} \times 30 = \mathbf{2188,280 \text{ (Gbytes/mes/célula)}}$$

#### Volumen mensual por emplazamiento

$$\hookrightarrow 2188,28 \text{ (Gbytes/mes/célula)} \times 3 = \mathbf{6564,842 \text{ (Gbytes/mes/emplazamiento)}}$$

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

Número de personas servidas por emplazamiento

$$\begin{aligned} \hookrightarrow & 6564,842 \text{ (Gbytes/mes/emplazamiento)} / 7 \text{ (Gbytes/mes/usuario)} = \\ & = \mathbf{937 \text{ (usuarios/emplazamiento)}} \end{aligned}$$

Nº eNodos B necesarios

$$\hookrightarrow 5.535 \text{ (usuarios)} / 937 \text{ (usuarios/emplazamiento)} = \mathbf{6 \text{ (eNodos B)}}$$

A continuación, se expone en las Tablas 7.1 a 7.9 los cálculos para las distintas modulaciones, diferentes configuraciones de la técnica MIMO y variando el CQI. Las capacidades de partida son en todos los casos para un ancho de banda de 20 MHz, ya que es el elegido para la simulación en la localización urbana.

MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	NO					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	2,27	3,50	5,63	8,99	13,11	17,58
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0003	0,0004	0,0007	0,0011	0,0016	0,0021
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	1,001	1,541	2,477	3,953	5,763	7,726
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	0,501	0,770	1,239	1,977	2,881	3,863
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	3,338	5,134	8,257	13,177	19,208	25,753
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	100,13	154,017	247,715	395,293	576,250	772,583
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	300,41	462,05	743,15	1185,88	1728,75	2317,75
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7					
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	42	66	106	169	246	331
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	132	84	53	33	23	17

**Tabla 7.1. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK sin MIMO**



MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	2 x 2					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	3,9649	6,0983	9,8082	15,6515	22,8165	30,5902
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0005	0,0007	0,0012	0,0019	0,0028	0,0037
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	1,7424	2,6799	4,3102	6,8781	10,0268	13,4429
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	0,8712	1,3400	2,1551	3,4391	5,0134	6,7215
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	5,8080	8,9330	14,3675	22,9270	33,4225	44,8098
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	174,23	267,99	431,03	687,81	1002,67	1344,29
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	522,72	803,97	1293,07	2063,43	3008,02	4032,88
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7					
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	74	114	184	294	429	576
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	55.352					
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10					
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	75	49	31	19	13	10

Tabla 7.2. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 2 x 2.

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	4 x 4					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	7,4285	11,4255	18,3763	29,3241	42,7481	57,3126
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0009	0,0014	0,0022	0,0036	0,0052	0,0070
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	3,2645	5,0210	8,0755	12,8866	18,7858	25,1862
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	1,6322	2,5105	4,0378	6,4433	9,3929	12,5931
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	10,881	16,7365	26,9184	42,9552	62,6192	83,9540
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	326,44	502,09	807,552	1288,65	1878,57	2518,62
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	979,34	1506,28	2422,65	3865,97	5635,73	7555,86
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7					
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	139	215	346	552	805	1079
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	40	26	16	11	7	6

**Tabla 7.3. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 4 x 4.**

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	NO		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	22,0751	28,6181	35,9805
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0027	0,0035	0,0044
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	9,7010	12,5763	15,8117
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	4,8505	6,2882	7,9059
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	32,3366	41,9211	52,7058
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	970,098	1257,632	1581,174
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	2910,29	3772,89	4743,52
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7		
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	415	538	677
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352		
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	14	11	9

**Tabla 7.4. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM sin MIMO**

MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	2 x 2		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	38,4107	49,7955	62,6061
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0047	0,0061	0,0076
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	16,8797	21,8828	27,5124
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	8,4399	10,9414	13,7562
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	56,2657	72,9427	91,7081
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	1687,972	2188,281	2751,243
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	5063,91	6564,84	8253,73
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7		
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	723	937	1179
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352		
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	8	6	5

Tabla 7.5. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 2 x 2.

MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	4 x 4		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	71,9649	93,2951	117,2964
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0088	0,0114	0,0143
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	31,6252	40,9988	51,5463
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	15,8126	20,4994	25,7731
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	105,4174	136,6627	171,8209
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	3162,522	4099,882	5154,627
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	9487,564	12299,647	15463,882
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7		
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	1355	1757	2209
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	55.352		
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10		
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	5	4	3

**Tabla 7.6. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 4 x 4.**

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

MODULACIÓN	64-QAM					
MIMO	NO					
CQI	10	11	12	13	14	15
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	40,8279	49,6735	58,3487	67,6339	76,4795	83,0554
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0050	0,0061	0,0071	0,0083	0,0093	0,0101
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	17,9420	21,8292	25,6415	29,7219	33,6091	36,4989
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	8,9710	10,9146	12,8208	14,8610	16,8046	18,2495
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	59,8065	72,7640	85,4717	99,0731	112,0305	121,6631
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	1794,19	2182,92	2564,15	2972,192	3360,915	3649,89
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	5382,59	6548,76	7692,45	8916,57	10082,74	10949,68
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7					
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	768	935	1098	1273	1440	1564
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	8	6	6	5	4	4

**Tabla 7.7. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM sin MIMO.**

MODULACIÓN	64-QAM					
MIMO	2 x 2					
CQI	10	11	12	13	14	15
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	71,0406	86,4319	101,5267	117,6829	133,0743	144,5163
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0087	0,0106	0,0124	0,0144	0,0162	0,0176
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	31,2190	37,9828	44,6162	51,7161	58,4799	63,5082
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	15,6095	18,9914	22,3081	25,8581	29,2400	31,7541
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	104,063	126,609	148,721	172,387	194,933	211,694
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	3121,90	3798,27	4461,62	5171,61	5847,99	6350,82
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	9365,70	11394,84	13384,87	15514,84	17543,97	19052,45
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7					
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	1337	1627	1912	2216	2506	2721
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	55.352					
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10					
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	5	4	3	3	3	3

**Tabla 7.8. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 2 x 2.**

MODULACIÓN	64-QAM
MIMO	4 x 4

CQI	10	11	12	13	14	15
<b>CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)</b>	133,0991	161,9357	190,2167	220,4864	249,3231	270,7605
<b>CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)</b>	0,0162	0,0198	0,0232	0,0269	0,0304	0,0331
<b>CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)</b>	58,4908	71,1632	83,5913	96,8935	109,5658	118,9866
<b>CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)</b>	29,2454	35,5816	41,7957	48,4467	54,7829	59,4933
<b>HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)</b>	194,9693	237,2105	278,6378	322,9782	365,2194	396,6218
<b>CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)</b>	5849,08	7116,32	8359,13	9689,34	10956,58	11898,65
<b>CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)</b>	17547,24	21348,95	25077,39	29068,04	32869,75	35695,96
<b>CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)</b>	7					
<b>NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)</b>	2506	3049	3582	4152	4695	5099
<b>POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE</b>	263.578					
<b>% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL</b>	21					
<b>NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE</b>	55.352					
<b>% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS</b>	10					
<b>NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE</b>	5.536					
<b>NÚMERO eNODOSB NECESARIOS</b>	3	2	2	2	2	2

**Tabla 7.9. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 4 x 4.**

### 7.1.1.2. DIMENSIONAMIENTO BASADO EN TASA DE DATOS

En este segundo caso, nos basaremos en la tasa requerida por el usuario como base para el desarrollo. Además, los pasos a seguir vienen dados por la Figura 28. Esta tasa la establecemos de acuerdo a la tasa media típica en el enlace descendente de 4G, 1 Megabit por



segundo, ya que no se puede llevar a cabo el dimensionamiento considerando la tasa de pico máxima de LTE. Aunque sabemos que se pueden otorgar velocidades más altas, nosotros estipulamos esta tasa en nuestros cálculos, basándonos en el análisis expuesto en [1]. Como sólo algunos de los suscriptores estarán transmitiendo datos de manera simultánea, consideramos como factor de carga un valor típico de 20.

De nuevo, partiremos del valor de capacidad correspondiente obtenido en las Tablas 5.3 a 5.11 para proceder a las operaciones.

### Data rate based dimensioning

Cell capacity	
Busy hour average loading 50%	x 50%
Required user data rate	/1 Mbps
Overbooking factor	/20
Average busy hour data rate per sub	= 50 kbps
3 sectors per site	x 3
<b>Total</b>	<b>X subs/site</b>

**Figura 7.3. Procedimiento seguido para dimensionamiento basado en tasa de datos [1]**

Vamos ahora a obtener el número de eNodos B que obtendríamos por este método aplicado a los dos casos analizados por el procedimiento de volumen de tráfico.

#### QPSK con MIMO 2x2, BW=20 MHz, CQI=6

Partimos de la capacidad conocida de 30,59 Megabits por segundo.

Carga en hora pico = 50 %

$$\hookrightarrow 30,59 \text{ (Mbits/seg/ célula)} \times 0,5 = 15,295 \text{ (Mbits/seg/célula)}$$

### Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.

Tasa requerida por usuario = 1Mbit/seg

$$\hookrightarrow 15,295 \text{ (Mbits/seg/ célula)} / 1 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = \mathbf{15 \text{ (usuarios/ célula)}}$$

Factor de overbooking = 20

$$\hookrightarrow 15 \text{ (usuarios/ célula)} \times 20 = \mathbf{300 \text{ (usuarios/ célula)}}$$

Número de personas servidas

$$\hookrightarrow 300 \text{ (usuarios/ célula)} \times 3 \text{ (células/emplazamiento)} \\ = \mathbf{900 \text{ (usuarios/emplazamiento)}}$$

eNodos B necesarios

$$\hookrightarrow 5.535 \text{ (usuarios)} / 900 \text{ (usuarios/emplazamiento)} = \mathbf{7 \text{ (eNodos B)}}$$

### 16-QAM con MIMO 2x2, BW=20 MHz, CQI=8

La capacidad en este caso era 49,79 Megabits por segundo.

Carga en hora pico = 50 %

$$\hookrightarrow 49,79 \text{ (Mbits/seg/ célula)} \times 0,5 = \mathbf{24,897 \text{ (Mbits/seg/célula)}}$$

Tasa requerida por usuario = 1Mbit/seg

$$\hookrightarrow 24,897 \text{ (Mbits/seg/ célula)} / 1 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = \mathbf{24 \text{ (usuarios/ célula)}}$$

Factor de overbooking = 20

$$\hookrightarrow 24,897 \text{ (usuarios/ célula)} \times 20 = \mathbf{480 \text{ (usuarios/ célula)}}$$

Número de personas servidas

$$\hookrightarrow 480 \text{ (usuarios/ célula)} \times 3 \text{ (células/emplazamiento)} \\ = \mathbf{1440 \text{ (usuarios/emplazamiento)}}$$

Nº de eNodosB necesarios

$$\hookrightarrow 5.535 \text{ (usuarios)} / 1440 \text{ (usuarios/emplazamiento)} = \mathbf{4 \text{ (eNodos B)}}$$

Tal y como hicimos para el caso de volumen de tráfico, se muestran en las Tablas 7.10 a 7.18 los cálculos para las diferentes configuraciones.

MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	NO					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	2,2787	3,5047	5,6369	8,9951	13,1129	17,5806
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	1,1393	1,7524	2,8185	4,4976	6,5565	8,7903
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	1	1	2	4	6	8
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	20	20	40	80	120	160
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	60	60	120	240	360	480
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	93	93	47	24	16	12

**Tabla 7.10. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK sin MIMO.**

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	2 x 2					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	3,9649	6,0983	9,8082	15,6515	22,8165	30,5902
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	1,9825	3,0491	4,9041	7,8258	11,4082	15,2951
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	1	3	4	7	11	15
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	20	60	80	140	220	300
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	60	180	240	420	660	900
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	55.352					
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10					
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	93	31	24	14	9	7

**Tabla 7.11. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 2 x 2.**

MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	4 x 4					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	7,4285	11,4255	18,3763	29,3241	42,7481	57,3126
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	3,7143	5,7127	9,1882	14,6621	21,3740	28,6563
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	3	5	9	14	21	28
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	60	100	180	280	420	560
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	180	300	540	840	1260	1680
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	31	19	11	7	5	4

Tabla 7.12. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 4 x 4.

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	NO		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	22,0751	28,6181	35,9805
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	11,0376	14,3091	17,9902
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	11	14	17
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	220	280	340
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50		
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	660	840	1020
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	55.352		
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10		
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	9	7	6

**Tabla 7.13. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM sin MIMO.**

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	2 x 2		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	38,4107	49,7955	62,6061
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	19,2054	24,8978	31,3030
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	19	24	31
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	380	480	620
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50		
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	1140	1440	1860
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352		
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	5	4	3

**Tabla 7.14. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 2 x 2.**

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	4 x 4		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	71,9649	93,2951	117,2964
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	35,9825	46,6475	58,6482
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	35	46	58
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	700	920	1160
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50		
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	2100	2760	3480
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352		
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	3	3	2

**Tabla 7.15. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 4 x 4.**



*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

MODULACIÓN	64-QAM					
MIMO	NO					
CQI	10	11	12	13	14	15
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	40,8279	49,6735	58,3487	67,6339	76,4795	83,0554
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	20,4140	24,8368	29,1743	33,8169	38,2397	41,5277
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	20	24	29	33	38	41
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	400	480	580	660	760	820
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	1200	1440	1740	1980	2280	2460
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	5	4	4	3	3	3

**Tabla 7.16. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM sin MIMO.**

MODULACIÓN	64-QAM					
MIMO	2 x 2					
CQI	10	11	12	13	14	15
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	71,0406	86,4319	101,5267	117,6829	133,0743	144,5163
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	35,5203	43,2160	50,7634	58,8415	66,5371	72,2582
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	35	43	50	58	66	72
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	700	860	1000	1160	1320	1440
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	2100	2580	3000	3480	3960	4320
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	3	3	2	2	2	2

**Tabla 7.17. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 2 x 2.**

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

MODULACIÓN	64-QAM					
MIMO	4 x 4					
CQI	10	11	12	13	14	15
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	133,0991	161,9357	190,2167	220,4864	249,3231	270,7605
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	66,5495	80,9679	95,1084	110,2432	124,6616	135,3803
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	66	80	95	110	124	135
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	1320	1600	1900	2200	2480	2700
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	3960	4800	5700	6600	7440	8100
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	263.578					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	55.352					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	10					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	5.536					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	2	2	1	1	1	1

**Tabla 7.18. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno urbano, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 4 x 4.**

Tras esto, vamos a realizar una comparativa entre estos dos tipos de análisis, para determinar cuál es el que demandará un despliegue de mayor nivel. La Tabla 7.19 muestra la citada comparativa.

			Nº eNodosB según volumen de tráfico	Nº eNodosB según tasa de datos
MODULACIÓN	MIMO	CQI		
QPSK	NO	1	132	93
	2 x 2		75	47
	4 x 4		40	31
	NO	2	84	53
	2 x 2		49	31
	4 x 4		26	19
	NO	3	53	47
	2 x 2		31	24
	4 x 4		16	11
	NO	4	33	24
	2 x 2		19	14
	4 x 4		11	7
	NO	5	23	16
	2 x 2		13	9
	4 x 4		7	5
	NO	6	17	12
	2 x 2		10	7
	4 x 4		6	4
16-QAM	NO	7	14	9
	2 x 2		8	5
	4 x 4		5	3
	NO	8	11	7
	2 x 2		6	4
	4 x 4		4	3
	NO	9	9	6
	2 x 2		5	3
	4 x 4		3	2
64-QAM	NO	10	8	5
	2 x 2		5	3
	4 x 4		3	2
	NO	11	6	4
	2 x 2		4	3
	4 x 4		2	1
	NO	12	6	4
	2 x 2		3	2
	4 x 4		2	1
	NO	13	5	3
	2 x 2		3	2

	4 x 4	14	2	1
	NO		4	3
	2 x 2		3	2
	4 x 4		2	1
	NO	15	4	3
	2 x 2		3	2
	4 x 4		2	1

**Tabla 7.19. Comparativa de eNodosB necesarios en el dimensionamiento por tráfico en entorno urbano.**

Como podemos observar en la Tabla 7.19, los resultados obtenidos con el análisis basado en la tasa de datos nos darán en todo momento un número menor de estaciones bases a desplegar. Por tanto, la planificación que realizaremos en RadioGIS será con el caso más desfavorable, en este caso el estimado según volumen de tráfico.

### 7.1.2. DIMENSIONAMIENTO DADO SEGÚN PÉRDIDAS MÁXIMAS

Este método nos permitirá determinar de cuántos eNodosB precisamos cuando las bases del cálculo son las pérdidas máximas presentes en el enlace descendente.

Primeramente, obtenemos el radio de cobertura de un único emplazamiento con ayuda de RadioGIS, colocando un emplazamiento en el medio urbano y observando la cantidad de superficie que es capaz de abarcar. Para poder realizar el cálculo de cobertura en RadioGIS equivalente al que se realizaría en el caso de poder incluir todos los elementos considerados en el balance del enlace mostrado en el apartado 6, definiremos una sensibilidad igual a las pérdidas máximas admisibles y anulamos el resto de términos. En dicho apartado el valor mínimo de estas es de 147,43 dB, por lo que la sensibilidad que nosotros definiremos será -147,43 dBm. El resto de variables del programa, que son la PIRE, las ganancias de las antenas y las pérdidas en recepción, las definimos con valor nulo. Esto es lo que aparece en las Figura 7.4 y 7.5.

**Figura 7.4. Parámetros de transmisión definidos en RadioGIS**

**Figura 7.5. Parámetros de recepción definidos en RadioGIS**

Además, el emplazamiento tendrá una altura de 30 metros, con un ángulo de elevación de la antena transmisora de 0 grados. Establecemos una altura en recepción de 1,5 metros y antena isotrópica, mientras que en transmisión colocamos una antena omnidireccional. Esta configuración se muestra en la Figuras 7.6 y 7.7. El modelo de propagación empleado es COST-231.

**cob\_pru2-Pérdidas de propagación**

estación base | estación móvil | parámetros comunes | zona de cálculo

ubicación:

Seleccionar Emplazamiento

coordenada x (m): 3691277

coordenada y (m): 5338149

altura (m) sobre el suelo: 30

antena

ruta: C:\RADIOGIS\diagramas\omnidireccional.dat Explorar

Plano E

Plano H

orientación

Plano Horizontal

Plano Vertical

acimut (0°,359°): 0

elevación (-90°,90°): 0

<-- Atrás Aceptar

Figura 7.6. Parámetros de la estación base definidos en RadioGIS.

estación base | estación móvil | parámetros comunes | zona de cálculo

antena

altura (m) sobre el suelo:

antena

ruta:

orientación

Plano Horizontal

Norte  
 $\phi = 0^\circ$

$+\phi$

acimut ( $0^\circ, 359^\circ$ ):

Plano Vertical

$\theta = 0^\circ$

$+\theta$

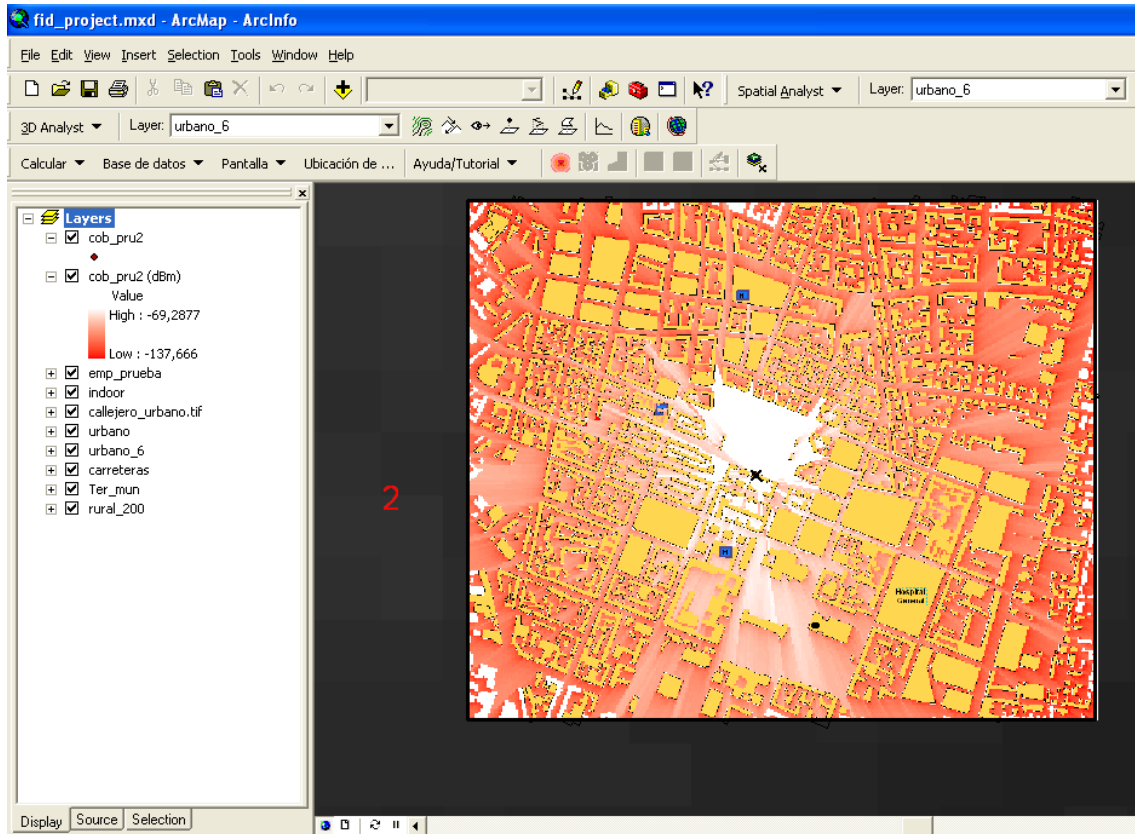
elevación ( $-90^\circ, 90^\circ$ ):

<-- Atrás    Aceptar

**Figura 7.7. Parámetros del terminal móvil definidos en RadioGIS.**

Tras la simulación, se observa a través de la Figura 7.8 que la estación base da cobertura a todo el área de la ciudad de Murcia considerada en RadioGIS, que es aproximadamente  $4 \text{ km}^2$ .





**Figura 7.8. Área cubierta en entorno urbano por un emplazamiento según el estudio de pérdidas máximas**

Seguidamente, con la ayuda de los mapas de Google, obtenemos el área del municipio de Murcia en el que realizamos el estudio, visible en la Figura 7.9. La superficie considerada será de aproximadamente 15 km<sup>2</sup>.



**Figura 7.9. Superficie de estudio en el entorno urbano, proporcionada por Google Maps**

Una vez realizados los dos pasos anteriores, dividiremos el área obtenida con Google Maps entre el área cubierta por un emplazamiento para obtener el número de eNodosB final.

$$\text{Nº eNodos B} = 15/4 = 3,75 = \boxed{4 \text{ (eNodos B)}}$$

Finalmente, observamos que el número de estaciones base obtenidas por este método es inferior al proporcionado por los casos que analizamos en RadioGIS. Esto es así debido a que aquí sólo consideramos las pérdidas en la transmisión de la señal, sin tener en cuenta ni la capacidad del eNodo B ni el tráfico que se desee cursar por el mismo.

## 7.2. ENTORNO RURAL

Para el medio rural, nuestro análisis irá dirigido al municipio de Fortuna. Al considerar el entorno rural como parte del proyecto, debíamos escoger un lugar cuya densidad de población fuese baja, como es el caso de Fortuna. Este término municipal cuenta con 11 pedanías: Garapacha, La Matanza, Caprés, Las Casicas, Peña de Zafra de arriba, Peña de Zafra de abajo, Los Baños, Fuenteblanca, Rambla Salada y Hoya Hermosa. La superficie total cubierta es de 148,5 km<sup>2</sup>, la cual cuenta con una población de 9623 habitantes según datos de 2013. Considerando la misma penetración de smartphones que en entorno urbano, un 67,2 %, nos quedará una cantidad de usuarios de internet móvil de 6467.

De la misma manera, tendremos en cuenta que únicamente un 21 % de esa cantidad serán usuarios de Vodafone, quedando así 1358 personas. A diferencia del núcleo urbano, aquí consideramos que sólo un 8 % de estos clientes tendrán contratado el servicio 4G, por lo que el número de usuarios final será de 109.

### 7.2.1. DIMENSIONAMIENTO DADO POR TRÁFICO

#### 7.2.1.1. DIMENSIONAMIENTO BASADO EN VOLUMEN DE TRÁFICO

Del mismo modo que en el entorno urbano, consideramos un consumo de tráfico medio mensual de 7 Gbytes. La única diferencia en los cálculos residirá en el número de usuarios objetivo, el resto de valores serán similares.

Realizaremos el cálculo para el tercer caso del apartado 5, cuyo ancho de banda es de 10 MHz y se corresponde con la configuración empleada en el término rural.

#### 64-QAM sin MIMO, BW=10 MHz, CQI=12

En los cálculos realizados, teníamos una tasa de bit neta de 29,17 Megabits por segundo.

#### Conversión de Mbts/seg a Gbytes/seg

$$\hookrightarrow 29,17 \text{ (Mbts/seg)} / (1024 \times 8) = 29,17 \text{ (Mbts/seg)} / 8192 = \mathbf{0,0035 \text{ (Gbytes/seg)}}$$

#### Conversión de Gbytes/seg a Gbytes/hora

$$\hookrightarrow 0,0035 \text{ (Gbytes/seg)} \times 3600 = \mathbf{12,82 \text{ (Gbytes/hora)}}$$

#### Carga en hora pico

$$\hookrightarrow 12,82 \text{ (Gbytes/hora)} \times 0,5 = \mathbf{6,41 \text{ (Gbytes/hora pico)}}$$

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

Carga diaria dada por hora pico

$$\hookrightarrow 6,41 \text{ (Gbytes/hora pico)} / 0,15 = \mathbf{42,73 \text{ (Gbytes/día)}}$$

Volumen mensual por célula

$$\hookrightarrow 42,73 \text{ (Gbytes/día)} \times 30 = \mathbf{1282,07 \text{ (Gbytes/mes/célula)}}$$

Volumen mensual por emplazamiento

$$\hookrightarrow 1282,07 \text{ (Gbytes/mes/célula)} \times 3 \text{ (célula/emplazamiento)} = \\ = \mathbf{3846,22 \text{ (Gbytes/mes/emplazamiento)}}$$

Número de personas servidas por emplazamiento

$$\hookrightarrow 3846,22 \text{ (Gbytes/mes/emplazamiento)} / 7 \text{ (Gbytes/mes/usuario)} = \\ = \mathbf{549 \text{ (usuarios/emplazamiento)}}$$

Nº de eNodosB necesarios

$$\hookrightarrow 109 \text{ (usuarios)} / 549 \text{ (usuarios/emplazamiento)} = \mathbf{1 \text{ (eNodo B)}}$$

A continuación, se expone en las Tablas 7.20 a 7.28 los cálculos para los restantes casos.

MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	NO					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	1,1393	1,7524	2,8185	4,4976	6,5565	8,7903
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005	0,0008	0,0011
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	0,5007	0,7701	1,2386	1,9765	2,8813	3,8629
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	0,2503	0,3850	0,6193	0,9882	1,4406	1,9315
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	1,6690	2,5670	4,1286	6,5882	9,6042	12,8764
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	50,0688	77,0086	123,8578	197,6468	288,1253	386,2916
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	150,21	231,03	371,57	592,94	864,37	1158,87
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7					
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	21	33	53	84	123	165
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	6	4	3	2	1	1

**Tabla 7.20. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK sin MIMO**

MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	2 x 2					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	1,9825	3,0491	4,9041	7,8258	11,4082	15,2951
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0002	0,0004	0,0006	0,0010	0,0014	0,0019
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	0,8712	1,3400	2,1551	3,4391	5,0134	6,7215
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	0,4356	0,6700	1,0776	1,7195	2,5067	3,3607
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	2,9040	4,4665	7,1837	11,4635	16,7113	22,4049
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	87,119	133,995	215,512	343,905	501,338	672,147
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	261,36	401,98	646,54	1031,72	1504,01	2016,44
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7					
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	37	57	92	147	214	288
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	3	2	2	1	1	1

**Tabla 7.21. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 2 x 2.**

MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	4 x 4					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	3,7143	5,7127	9,1882	14,6621	21,3740	28,6563
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0005	0,0007	0,0011	0,0018	0,0026	0,0035
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	1,6322	2,5105	4,0378	6,4433	9,3929	12,5931
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	0,8161	1,2552	2,0189	3,2216	4,6964	6,2966
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	5,4408	8,3683	13,4592	21,4776	31,3096	41,9770
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	163,22	251,05	403,77	644,32	939,29	1259,31
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	489,67	753,14	1211,33	1932,98	2817,86	3777,93
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7					
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	69	107	173	276	402	539
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	2	2	1	1	1	1

Tabla 7.22. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 4 x 4.



MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	NO		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	11,0376	14,3091	17,9902
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0013	0,0017	0,0022
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	4,8505	6,2882	7,9059
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	2,4252	3,1441	3,9529
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	16,1683	20,9605	26,3529
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	485,0493	628,8163	790,5870
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	1455,1479	1886,4489	2371,7610
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7		
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	207	269	338
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	1359		
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8		
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	109		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1

**Tabla 7.23. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM sin MIMO.**



MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	2 x 2		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	19,2054	24,8978	31,3030
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0023	0,0030	0,0038
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	8,4399	10,9414	13,7562
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	4,2199	5,4707	6,8781
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	28,1329	36,4713	45,8540
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	843,9858	1094,1403	1375,6214
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	2531,95	3282,42	4126,86
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7		
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	361	468	589
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	1359		
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8		
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	109		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1

Tabla 7.24. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 2 x 2.

MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	4 x 4		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	35,9825	46,6475	58,6482
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0044	0,0057	0,0072
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	15,8126	20,4994	25,7731
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	7,9063	10,2497	12,8866
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	52,7087	68,3314	85,9105
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	1581,2607	2049,9411	2577,3136
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	4743,78	6149,82	7731,94
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7		
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	677	878	1104
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	1359		
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	109		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1

Tabla 7.25. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 4 x 4.

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

MODULACIÓN	64-QAM					
MIMO	NO					
CQI	10	11	12	13	14	15
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	20,4140	24,8368	29,1743	33,8169	38,2397	41,5277
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0025	0,0030	0,0036	0,0041	0,0047	0,0051
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	8,9710	10,9146	12,8208	14,8610	16,8046	18,2495
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	4,4855	5,4573	6,4104	7,4305	8,4023	9,1247
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	29,9033	36,3820	42,7359	49,5365	56,0152	60,8316
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	897,09	1091,45	1282,07	1486,09	1680,45	1824,94
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	2691,29	3274,37	3846,22	4458,28	5041,37	5474,84
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7					
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	384	467	549	636	720	782
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1	1	1	1

**Tabla 7.26. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM sin MIMO.**

MODULACIÓN	64-QAM					
MIMO	2 x 2					
CQI	10	11	12	13	14	15
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	35,5203	43,2160	50,7634	58,8415	66,5371	72,2582
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0043	0,0053	0,0062	0,0072	0,0081	0,0088
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	15,6095	18,9914	22,3081	25,8581	29,2400	31,7541
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	7,8048	9,4957	11,1541	12,9290	14,6200	15,8770
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	52,0317	63,3047	74,3604	86,1936	97,4665	105,8469
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	1560,95	1899,14	2230,81	2585,80	2923,99	3175,40
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	4682,85	5697,42	6692,43	7757,42	8771,98	9526,22
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7					
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	668	813	956	1108	1253	1360
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1	1	1	1

**Tabla 7.27. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 2 x 2.**

*Apartado 7 – Cálculo de número de eNodos B.*

MODULACIÓN	64-QAM					
MIMO	4 x 4					
CQI	10	11	12	13	14	15
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	66,5495	80,9679	95,1084	110,2432	124,6616	135,3803
CAPACIDAD (GBYTES/SEG/CELDA)	0,0081	0,0099	0,0116	0,0135	0,0152	0,0165
CAPACIDAD (GBYTES/HORA/CELDA)	29,2454	35,5816	41,7957	48,4467	54,7829	59,4933
CARGA EN HORA PICO = 50 % (GBYTES/HORA PICO/CELDA)	14,6227	17,7908	20,8978	24,2234	27,3915	29,7466
HORA PICO OCUPA 15 % DEL CONSUMO DIARIO (GBYTES/DÍA/CELDA)	97,4847	118,6053	139,3189	161,4891	182,6097	198,3109
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/CELDA)	2924,53	3558,15	4179,56	4844,67	5478,29	5949,32
CAPACIDAD MENSUAL (GBYTES/MES/EMPLAZAMIENTO)	8773,61	10674,47	12538,69	14534,01	16434,87	17847,98
CONSUMO MEDIO MENSUAL (GBYTES/MES/USUARIO)	7					
NÚMERO PERSONAS SERVIDAS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	1253	1524	1791	2076	2347	2549
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1	1	1	1

**Tabla 7.28. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según volumen de tráfico, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 4 x 4.**

### 7.2.1.2. DIMENSIONAMIENTO BASADO EN TASA DE DATOS

De nuevo, fijaremos una tasa de 1 Megabit por segundo como velocidad requerida por el usuario, atendiendo a una velocidad media de 50 Kilobits por segundo en la hora pico.

Realizaremos ahora el análisis para el caso de la modulación 64-QAM a través de este método.

**64-QAM sin MIMO, BW=10 MHz, CQI=12**

Partimos de la capacidad conocida de 29,17 Megabits por segundo.

Carga en hora pico = 50 %

$$\hookrightarrow 29,17 \text{ (Mbits/seg/ célula)} \times 0,5 = \mathbf{14,58 \text{ (Mbits/seg/célula)}}$$

Tasa requerida por usuario = 1Mbit/seg

$$\hookrightarrow 14,58 \text{ (Mbits/seg/ célula)} / 1 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = \mathbf{14 \text{ (usuarios/ célula)}}$$

Factor de overbooking = 20

$$\hookrightarrow 14 \text{ (usuarios/ célula)} \times 20 = \mathbf{280 \text{ (usuarios/ célula)}}$$

Número de personas servidas

$$\hookrightarrow 280 \text{ (usuarios/ célula)} \times 3 \text{ (células/emplazamiento)} = \mathbf{840 \text{ (usuarios/emplazamiento)}}$$

Nº de eNodosB necesarios

$$\hookrightarrow 109 \text{ (usuarios)} / 875 \text{ (usuarios/emplazamiento)} = \mathbf{1 \text{ (eNodo B)}}$$

Tal y como hicimos para el caso de volumen de tráfico, se muestran en las Tablas 7.29 a 7.37 los cálculos para las diferentes configuraciones.

MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	NO					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	1,1393	1,7524	2,8185	4,4976	6,5565	8,7903
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	0,5697	0,8762	1,4092	2,2488	3,2782	4,3951
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	1	1	1	2	3	4
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	20	20	20	40	60	80
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	60	60	60	120	180	240
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	2	2	2	1	1	1

**Tabla 7.29. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK sin MIMO.**

MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	2 x 2					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	1,9825	3,0491	4,9041	7,8258	11,4082	15,2951
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	0,9912	1,5246	2,4521	3,9129	5,7041	7,6475
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	1	1	2	3	5	7
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	20	20	40	60	100	140
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	60	60	120	180	300	420
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	2	2	1	1	1	1

Tabla 7.30. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 2 x 2.



MODULACIÓN	QPSK					
MIMO	4 x 4					
CQI	1	2	3	4	5	6
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	3,7143	5,7127	9,1882	14,6621	21,3740	28,6563
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	1,8571	2,8564	4,5941	7,3310	10,6870	14,3282
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	1	2	4	7	10	14
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	20	40	80	140	200	280
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	60	120	240	420	600	840
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	2	1	1	1	1	1

Tabla 7.31. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación QPSK con MIMO 4 x 4.

MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	NO		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	11,0376	14,3091	17,9902
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	5,5188	7,1545	8,9951
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	5	7	8
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	100	140	160
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50		
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	300	420	480
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	1359		
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8		
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	109		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1

Tabla 7.32. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM sin MIMO.

MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	2 x 2		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	19,2054	24,8978	31,3030
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	9,6027	12,4489	15,6515
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	9	12	15
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	180	240	300
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50		
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	540	720	900
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	1359		
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8		
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	109		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1

Tabla 7.33. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 2 x 2.

MODULACIÓN	16-QAM		
MIMO	4 x 4		
CQI	7	8	9
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	35,9825	46,6475	58,6482
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	17,9912	23,3238	29,3241
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	17	23	29
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	340	460	580
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50		
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	1020	1380	1740
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467		
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21		
NÚMERO DE SUSCRITORES DE VODAFONE	1359		
% SUSCRITORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8		
NÚMERO DE SUSCRITORES CON SERVICIOS 4G LTE	109		
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1

Tabla 7.34. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 16-QAM con MIMO 4 x 4.

MODULACIÓN	64-QAM					
MIMO	NO					
CQI	10	11	12	13	14	15
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	20,4140	24,8368	29,1743	33,8169	38,2397	41,5277
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	10,2070	12,4184	14,5872	16,9085	19,1199	20,7638
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	10	12	14	16	19	20
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	200	240	280	320	380	400
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	600	720	840	960	1140	1200
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1	1	1	1

**Tabla 7.35. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM sin MIMO.**

MODULACIÓN	64-QAM					
MIMO	2 x 2					
CQI	10	11	12	13	14	15
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	35,5203	43,2160	50,7634	58,8415	66,5371	72,2582
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	17,7602	21,6080	25,3817	29,4207	33,2686	36,1291
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	17	21	25	29	33	36
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	340	420	500	580	660	720
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	1020	1260	1500	1740	1980	2160
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1	1	1	1

Tabla 7.36. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 2 x 2.

MODULACIÓN	64-QAM					
MIMO	4 x 4					
CQI	10	11	12	13	14	15
CAPACIDAD (MBITS/SEG/CELDA)	66,5495	80,9679	95,1084	110,2432	124,6616	135,3803
CAPACIDAD CONSIDERANDO CARGA EN HORA PICO = 50 % (MBITS/SEG/CELDA)	33,2748	40,4839	47,5542	55,1216	62,3308	67,6901
Nº USUARIOS SEGÚN TASA DE DATOS REQUERIDA = 1MBITS/SEG/USUARIO	33	40	47	55	62	67
Nº USUARIOS CONSIDERANDO FACTOR OVERBOOKING = 20	660	800	940	1100	1240	1340
TASA DE DATOS MEDIA POR USUARIO EN HORA PICO (KBITS/SEG)	50					
Nº USUARIOS SERVIDOS (USUARIOS/EMPLAZAMIENTO)	1980	2400	2820	3300	3720	4020
POBLACIÓN QUE UTILIZA SMARTPHONE	6467					
% POBLACIÓN QUE UTILIZA SERVICIOS DE VODAFONE EN TELEFONÍA MÓVIL	21					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES DE VODAFONE	1359					
% SUSCRIPTORES DE VODAFONE CON SERVICIOS 4G LTE CONTRATADOS	8					
NÚMERO DE SUSCRIPTORES CON SERVICIOS 4G LTE	109					
NÚMERO eNODOSB NECESARIOS	1	1	1	1	1	1

**Tabla 7.37. Cálculo de número de eNodosB necesarios en entorno rural, según tasa de datos, para distintos valores de CQI considerando modulación 64-QAM con MIMO 4 x 4.**

De forma similar al caso urbano, comparamos en la Tabla 7.38 el número de eNodosB obtenidos en cada caso.

			Nº eNodosB según volumen de tráfico	Nº eNodosB según tasa de datos
MODULACIÓN	MIMO	CQI		
QPSK	NO	1	6	2
	2 x 2		3	2
	4 x 4		2	2
	NO	2	4	2
	2 x 2		2	2
	4 x 4		2	1
	NO	3	3	2
	2 x 2		2	1
	4 x 4		1	1
	NO	4	2	1
	2 x 2		1	1
	4 x 4		1	1
	NO	5	1	1
	2 x 2		1	1
	4 x 4		1	1
	NO	6	1	1
	2 x 2		1	1
	4 x 4		1	1
16-QAM	NO	7	1	1
	2 x 2		1	1
	4 x 4		1	1
	NO	8	1	1
	2 x 2		1	1
	4 x 4		1	1
	NO	9	1	1
	2 x 2		1	1
	4 x 4		1	1
64-QAM	NO	10	1	1
	2 x 2		1	1
	4 x 4		1	1
	NO	11	1	1
	2 x 2		1	1
	4 x 4		1	1
	NO	12	1	1
	2 x 2		1	1
	4 x 4		1	1
	NO	13	1	1
	2 x 2		1	1
	4 x 4		1	1
	NO	14	1	1
	2 x 2		1	1



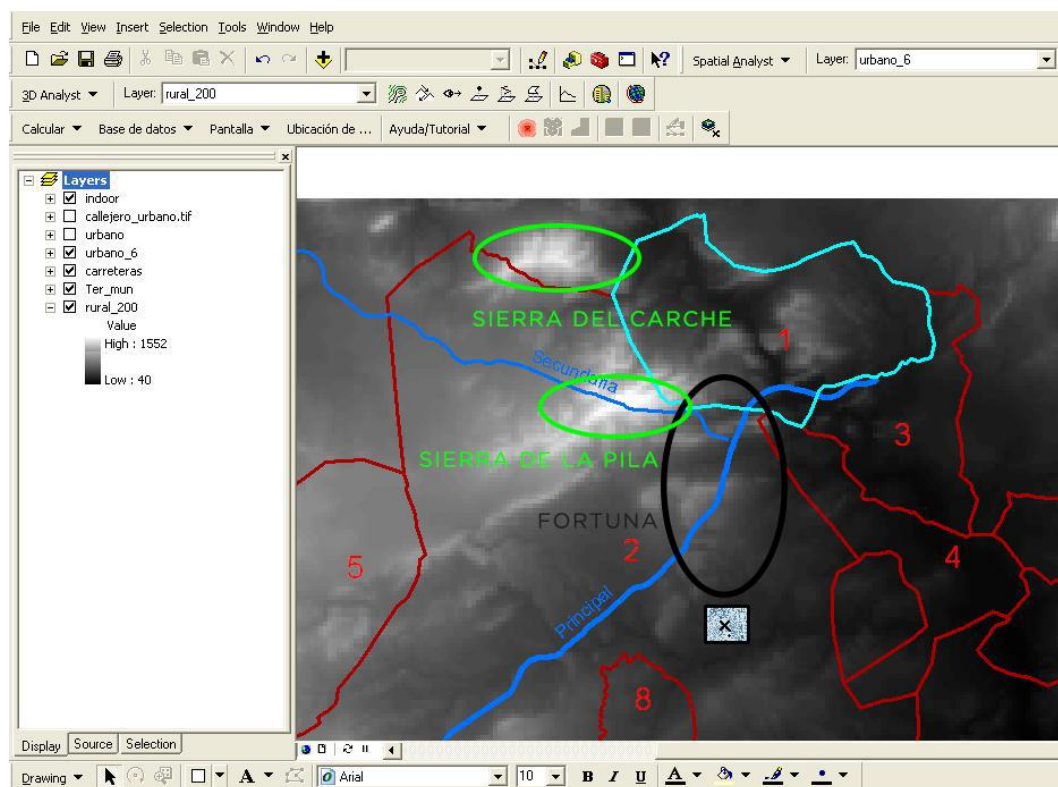
	4 x 4		1	1
	NO		1	1
	2 x 2	15	1	1
	4 x 4		1	1

**Tabla 7.38. Comparativa de eNodosB necesarios en el dimensionamiento por tráfico en entorno rural.**

En este entorno vemos que, al ser un número de usuarios menor entonces se requerirá de un número inferior de estaciones base. Además, a partir de la configuración MIMO 2x2 con modulación QPSK y CQI con valor 4, el número de eNodosB requerido será similar en ambos estudios. Por tanto, para la planificación en RadioGIS del entorno rural podremos considerar cualquiera de los dos dimensionamientos, ya que el número de emplazamientos resulta ser el mismo.

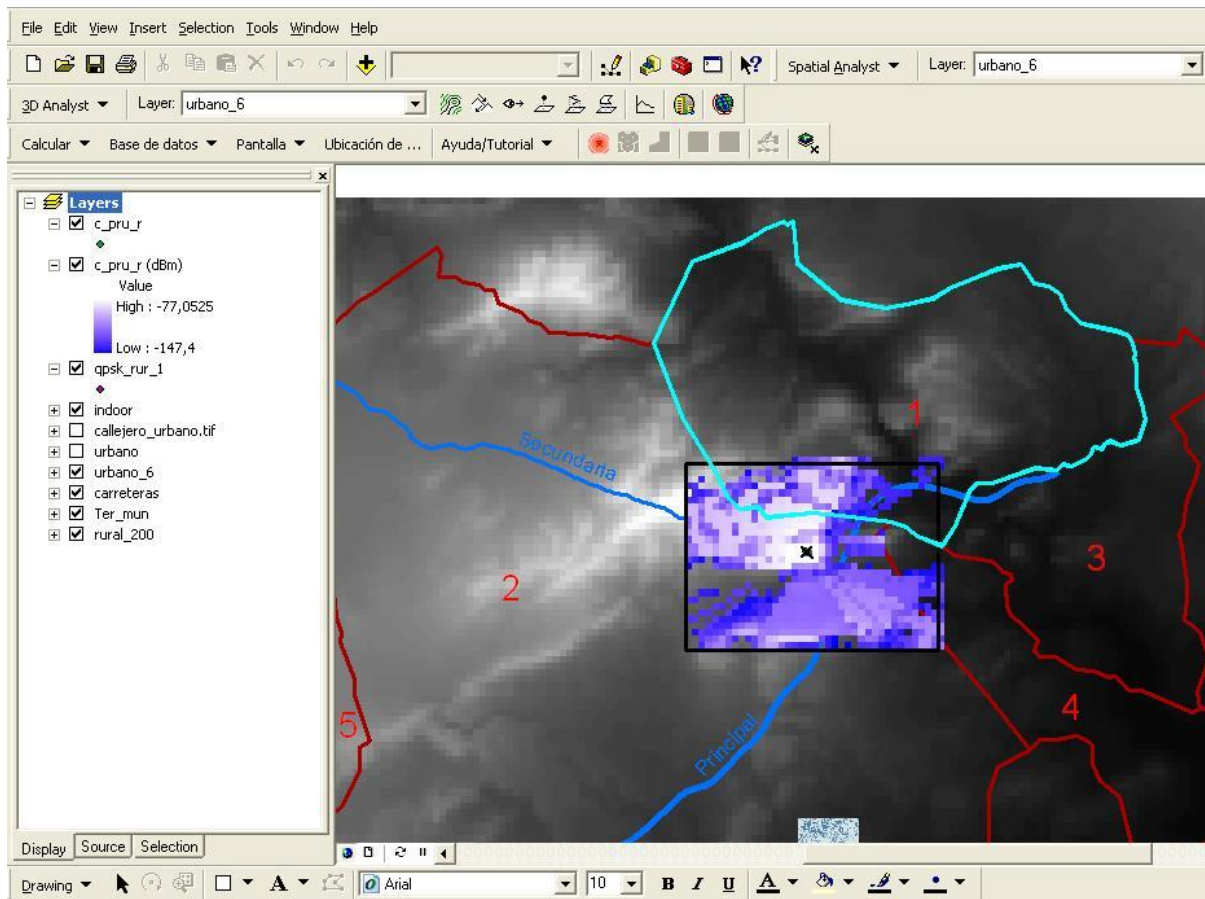
## 7.2.2. DIMENSIONAMIENTO DADO SEGÚN PÉRDIDAS MÁXIMAS

De nuevo en esta planificación las bases del cálculo son las pérdidas máximas presentes en el enlace descendente. Realizaremos el estudio de la cobertura de un emplazamiento de la misma forma que en el entorno urbano pero, en este caso, en el municipio de Fortuna. En la Figura 7.10 observamos esta zona en RadioGIS, encontrándose Fortuna junto a la Sierra de la Pila (1.264 m.) y más abajo que la Sierra del Carche (1.372 m.). Esta zona montañosa de gran altitud queda reflejada en RadioGIS con un color blanquecino.



**Figura 7.10. Zona rural relativa a Fortuna que consideramos en RadioGIS**

Los datos a introducir en el software de RadioGIS serán similares a los que utilizamos en este mismo dimensionamiento en el área urbana, exceptuando la frecuencia (800 MHz), el modelo de propagación (UIT R-526) y el diagrama de radiación presente en la antena emisora (omnidireccional). El resultado de dicho análisis de cobertura se muestra en la Figura 7.11.



**Figura 7.11. Área cubierta en entorno rural por un emplazamiento según estudio de pérdidas máximas**

Comprobamos que con un único emplazamiento damos servicio a toda la zona de interés, la cual se encuentra delimitada con el recuadro.

De nuevo obtenemos una muestra visual, Figura 7.12, de la localización de estudio a través de la herramienta Google Maps. La superficie considerada, tal y como mencionábamos anteriormente, será de  $148,5 \text{ km}^2$ .



Tal y como hemos apreciado en la Figura 7.11, un único eNodo B nos bastará para cumplir nuestro cometido. Por tanto, el número de estaciones base obtenido será de igual cantidad que para los casos considerados en los anteriores dimensionamientos, ya que es imposible hacer un despliegue de menos de un eNodo B.

## 8. ESTUDIO DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPLEADOS

Los modelos de propagación nos permiten realizar una estimación de las pérdidas que tendremos presentes en nuestra comunicación. En función de las características orográficas del escenario de interés, haremos uso de unos u otros modelos. En nuestro caso como tenemos dos entornos claramente diferenciados, urbano y rural, habrá que aplicar en cada caso el modelo de propagación adecuado. Estos intervendrán directamente en las simulaciones llevadas a cabo en RadioGIS.

Los modelos que incluiremos en nuestro análisis serán COST-231 y Har-Xia-Bertoni para el escenario urbano, y UIT R-526 para la localización rural.

### 8.1. ENTORNO URBANO

Podemos encontrarnos distintos diseños de células, según la densidad de la población. En nuestro caso, nos centraremos tanto en un diseño macrocelular a través del modelo COST-231, también conocido como Walfisch-Ikegami, como en una configuración de microcélula, basándonos en el modelo Har-Xia-Bertoni.

#### 8.1.1. MODELO COST-231 O WALFISCH-IKEGAMI

Este modelo semi-empírico se basa en los modelos de Ikegami y de Walfisch-Bertoni, donde este último tiene en cuenta la influencia de los edificios existentes entre transmisor y receptor. Gracias a correcciones empíricas sobre estos modelos anteriores, COST-231 es más preciso y requiere nuevos factores: orientación de la calle respecto a la dirección de la línea que une transmisor y receptor, la anchura de las calles, transmisión por la parte baja de los edificios suponiendo que la antena transmisora se encuentra a una altura menor que la de los tejados, así como márgenes de distancia al transmisor y tipo de entorno urbano [28].

En caso de que exista visión directa en el enlace, se considerarán únicamente las pérdidas en espacio libre. Además, estas sólo dependerán de la distancia  $R$  que separa a transmisor y receptor [28].

$$\left\{ \begin{array}{l} L_o = 32,4 + 20 \cdot \log_{10}(f(MHz)) + 20 \cdot \log_{10}(R(Km)), \text{ si } R < 20 \text{ m.} \\ L_o = 42,6 + 20 \cdot \log_{10}(f(MHz)) + 26 \cdot \log_{10}(R(Km)), \text{ si } R \geq 20 \text{ m.} \end{array} \right.$$

**Ecuación 7**

Por otro lado, si no tenemos situación de visión directa, habrá que considerar dos factores añadidos a estas pérdidas de espacio libre: propagación sobre los edificios ( $L_{msd}$ ) y difracción en los tejados cercanos al receptor ( $L_{rts}$ ) [28].

$$L(dB) = L_o + L_{msd} + L_{rts}$$

**Ecuación 8**

Estas tres variables son las mismas que describe el modelo de Walfisch-Bertoni. Además, en este caso, para calcular  $L_o$  emplearíamos siempre la fórmula superior de la ecuación 7. Para el factor que modela la propagación sobre los edificios, tenemos la Ecuación 9 [28]:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \log_{10}(R(Km)) + k_f \cdot \log_{10}(f(MHz)) - 9 \cdot \log_{10} b(m)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \cdot \log_{10}(1 + \Delta h_B(m)) & \text{donde } \Delta h_B = h_{tx} - h \\ 0 & \text{si } \Delta h_B < 0 \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \Delta h_B \geq 0 \\ 54 - 0,8 \cdot \Delta h_B(m) & \Delta h_B < 0 \text{ y } R \geq 0,5 \\ 54 - 1,6 \cdot \Delta h_B(m) & \Delta h_B < 0 \text{ y } R < 0,5 \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \Delta h_B \geq 0 \\ 18 - 15 \cdot \frac{\Delta h_B(m)}{h(m)} & \Delta h_B < 0 \end{cases}$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \cdot \left( \frac{f(MHz)}{925} - 1 \right) & \rightarrow \text{ciudades de tamaño medio y zonas suburbanas} \\ & \text{con densidad moderada de vegetación.} \\ -4 + 1,5 \cdot \left( \frac{f(MHz)}{925} - 1 \right) & \rightarrow \text{grandes centros metropolitanos.} \end{cases}$$

### Ecuación 9

Donde  $\Delta h_B$  se corresponde con la diferencia entre la altura de la antena transmisora ( $h_{tx}$ ) y la altura media de los edificios ( $h$ ),  $R$  con la distancia de separación entre transmisor y receptor,  $f$  es la frecuencia en megahercios y  $b$  hace referencia a la distancia media entre edificios en el perfil que une al transmisor y al receptor. Esto se puede ver en la Figura 8.1.

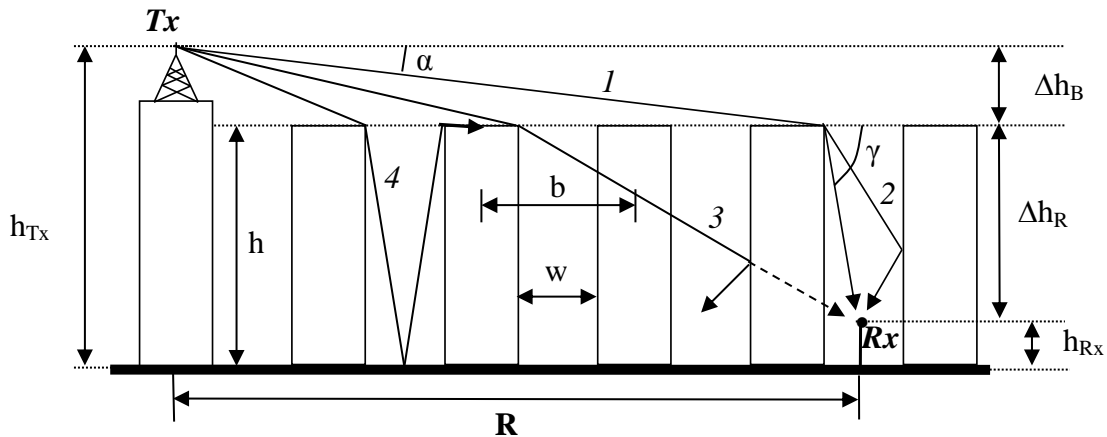
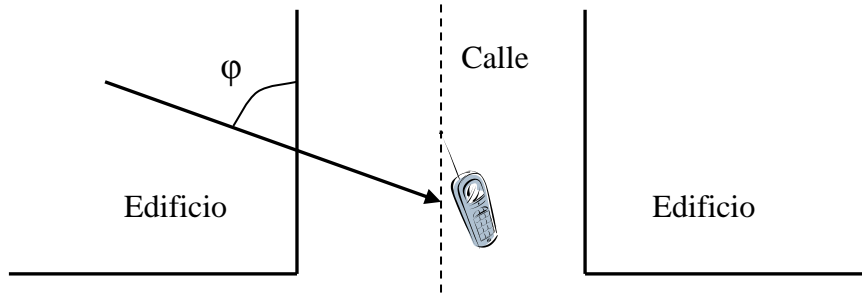


Figura 8.1. Entorno de propagación, elementos y contribuciones en el modelo de Walfisch-Bertoni [28]

Con la Ecuación 9 se aprecia una ventaja que presenta Walfisch-Ikegami frente al modelo Walfisch-Bertoni, que es la posibilidad de considerar la antena transmisora con una altura inferior a la de los edificios ( $\Delta h_B < 0$ ) a través del factor  $L_{bsh}$ . Además, en esas condiciones también se tiene en cuenta el aumento en las pérdidas de propagación a través de  $k_a$ . El término  $k_d \cdot \log(R)$  representa la relación entre las pérdidas de difracción y la distancia, mientras que  $k_f$  tiene en cuenta la frecuencia de trabajo. Este último factor toma como referencia la frecuencia de 925 MHz con la que se realizaron las mediciones oportunas [28].

La aportación de Ikegami a este modelo viene dada en el último término,  $L_{rts}$ , con el que se calculan las pérdidas aportadas por la difracción en los tejados cercanos al receptor. Lo que se hace es considerar un ángulo que relacione la dirección de rayo directo con la dirección del eje de la calle donde se encuentra el terminal receptor. Este se puede apreciar de forma más clara en la Figura 8.2.



**Figura 8.2. Ángulo  $\varphi$  en el modelo de Walfisch-Ikegami (COST-231) [28]**

Para hallar ese último factor lo hacemos a través de la Ecuación 10.

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \cdot \log_{10}(w) + 10 \cdot \log_{10}(f(MHz)) + 20 \cdot \log_{10}(\Delta h_R) + L_{ori}$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,3571 \cdot \varphi & 0 \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2,5 + 0,075 \cdot (\varphi - 35^\circ) & 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4 - 0,114 \cdot (\varphi - 55^\circ) & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases}$$

#### Ecuación 10

Donde  $L_{ori}$  hace referencia a las pérdidas por la orientación de la calle,  $\varphi$  en grados es el ángulo anteriormente citado y el término  $w$  se corresponde con la anchura de las calles, otra de las mejoras de este modelo. Es importante saber que en caso de que las pérdidas totales por difracción, equivalentes a la suma de  $L_{msd}$  y  $L_{rts}$ , tengan un valor negativo entonces estos dos factores se igualarán a cero para que no tengan aportación como ganancia. Por tanto, sólo se considerarían las pérdidas por espacio libre.

Los parámetros para los que se ha demostrado que este modelo es preciso es para frecuencias entre los 900 y los 1800 MHz y distancias de separación entre 10 metros y 3 Km. Aunque consideramos la posibilidad de que la antena de transmisión esté por debajo de la altura media de los edificios, el rendimiento es superior cuando se da la situación de  $\Delta h_B \geq 0$  [28].

### 8.1.2. MODELO HAR-XIA-BERTONI

En este caso, nos encontramos con un modelo aplicado a microcélulas. Estas son de menor tamaño que las macrocélulas, por lo que se pueden utilizar mayores frecuencias y también aumentar el número de suscriptores al dividir el espacio en microcélulas. Sin embargo, el radio de las zonas de Fresnel en estas será menor y, con ello, se puede producir una obstrucción con mayor facilidad.

Profundizando en este modelo concreto, nos encontramos de nuevo con un modelo semi-empírico, aunque este puede servir tanto en entornos urbanos como rurales. La campaña de medidas se realizó en San Francisco, lo que permitió desarrollar la parte empírica a través de distintas rectas de regresión en función del camino seguido por el receptor. Con estas se sacó la conclusión de que el modelo considera dos casos distintos: transmisión con visión directa y transmisión sin visión directa. Además, dentro de cada uno, se diferenciará si el entorno posee edificios altos (zona urbana) o edificios de poca altura (zona rural) [28].

En el caso de encontrarnos en zona rural y sin visión directa, las pérdidas se estiman a través de la Ecuación 11:

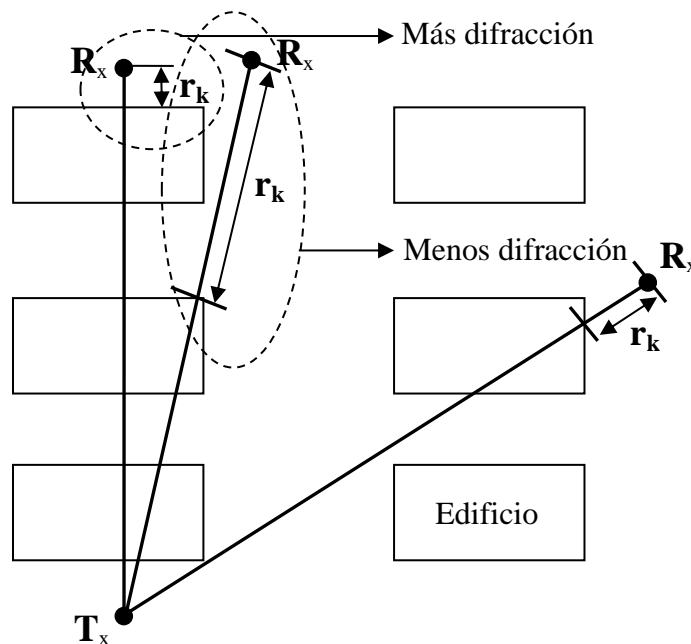
$$\begin{aligned}
 L(\text{dB}) = & [139,01 + 42,59 \\
 & \cdot \log_{10}(f(\text{MHz}))] - [14,97 + 4,99 \\
 & \cdot \log_{10}(f(\text{MHz}))] \cdot \text{sign}(\Delta h_B) \cdot \log_{10}(1 + |\Delta h_B|) + [40,67 - 4,57 \cdot \text{sign}(\Delta h_B) \\
 & \cdot \log_{10}(1 + |\Delta h_B|)] \cdot \log_{10}(R(\text{Km})) + 20 \cdot \log_{10}(\Delta h_R/7,8) + 10 \cdot \log_{10}(20/r_k)
 \end{aligned}$$

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} +1 & x \geq 0 \\ -1 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

**Ecuación 11**

Donde  $\Delta h_B$  y  $\Delta h_R$  tienen similar significado que en el modelo anterior, apreciándose en la Figura 37. El factor  $r_k$  hace referencia a la distancia euclídea entre el tejado más cercano al receptor donde se produce la difracción y el mismo receptor, tal y como se observa en la Figura 8.3.





**Figura 8.3. Mapa del entorno urbano con varios receptores en los que no existe visión directa [28]**

La ecuación 11 considera, igual que el modelo Walfisch-Ikegami, las pérdidas en espacio libre, las debidas a la propagación en los edificios y las de difracción en los tejados cercanos al receptor. Asimismo, añade algunos factores de corrección como son los dos últimos factores, el primero en relación a la altura relativa de los edificios y el segundo en relación a la distancia entre el receptor y el tejado más cercano.

Por otro lado, consideramos el caso en que no hay visión directa pero situados en un entorno urbano. Aquí el efecto de reflexión tiene mayor peso que el de difracción, por lo que no habrá que aplicar las correcciones anteriores. Si el trayecto seguido por el receptor se traza en una calle paralela a la del transmisor, la ecuación que evalúa las pérdidas es:

$$L(\text{dB}) = 135,41 + 12,49 \cdot \log_{10}(f(\text{MHz})) - 4,99 \cdot \log_{10}(h_{tx}) + (46,84 - 2,34 \cdot \log_{10}(h_{tx})) \cdot \log_{10}(R(\text{Km}))$$

### Ecuación 12

Si en lugar de ese camino se sigue uno en calles transversales o en zig-zag, las pérdidas vienen dadas por la Ecuación 13.



$$L(dB) = 143,21 + 29,74 \cdot \log_{10}(f(MHz)) - 0,99 \cdot \log_{10}(h_{tx}) + (47,23 + 3,72 \cdot \log_{10}(h_{tx})) \cdot \log_{10}(R(Km))$$

### Ecuación 13

Finalmente, falta considerar la situación en la que tengamos de rayo directo. De la parte empírica, en relación a las rectas de regresión, se extrae que existe una distancia para la cual las pérdidas comienzan a aumentar con mayor rapidez. Esto indica el punto de ruptura que existe para el modelo a dos rayos [28]. Este punto de ruptura se obtiene con la siguiente ecuación.

$$R_{bk} = \frac{4 \cdot h_{rx} \cdot h_{tx}}{1000 \cdot \lambda} (Km)$$

### Ecuación 14

Una vez conocemos este valor, procedemos al cálculo de las pérdidas con la Ecuación 15, cuya validez es compartida tanto en zona urbana como rural.

$$L(dB) = 81,14 + 39,40 \cdot \log_{10}(f(MHz)) - 0,09 \cdot \log_{10}(h_{tx}) + (15,80 - 5,73 \cdot \log_{10}(h_{tx})) \cdot \log_{10}(R(Km)) \quad \text{si } R < R_{bk}$$

$$L(dB) = [48,38 - 32,19 \cdot \log_{10}(R_{bk}(Km))] + 45,70 \cdot \log_{10}(f(MHz)) + (25,34 - 13,90 \cdot \log_{10}(R_{bk})) \cdot \log_{10}(h_{tx}) + (32,10 + 13,90 \cdot \log_{10}(h_{tx})) \cdot \log_{10}(R(Km)) + 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1,6}{h_{rx}}\right) \quad \text{si } R > R_{bk}$$

### Ecuación 15

Todos los casos expuestos son válidos en el rango de frecuencias entre 900 MHz y 2 GHz, con una altura relativa ( $\Delta h_B$ ) entre -8 y 6 metros, y una distancia entre transmisor y receptor de entre 5 metros y 3 Km [28].

## 8.2. ENTORNO RURAL

La principal diferencia existente entre el anterior entorno y este es el grado de urbanización, que en el caso rural es reducido o inexistente. Por esto, hay modelos desarrollados únicamente para este tipo de situaciones. Además, hay determinados modelos diseñados para entornos urbanos macrocelulares que también tendrán aplicación apta para localizaciones rurales.

Nosotros hacemos uso del modelo UIT R-526 para el entorno rural.

### 8.2.1. MODELO UIT R-526

Este es un modelo generalizado del método de Epstein-Peterson [28], el cual únicamente considera dos obstáculos en la trayectoria transmisor-receptor, ya que con UIT R-526 podemos considerar un número N de obstáculos.

Primeramente, debemos tener en cuenta el perfil orográfico, de donde obtendremos los obstáculos dominantes. Estos junto con transmisor y receptor serán los principales puntos de interés para la obtención de las pérdidas por difracción. Si nos fijamos en el ejemplo de la Figura 8.4, el obstáculo dominante será  $O_i$ .

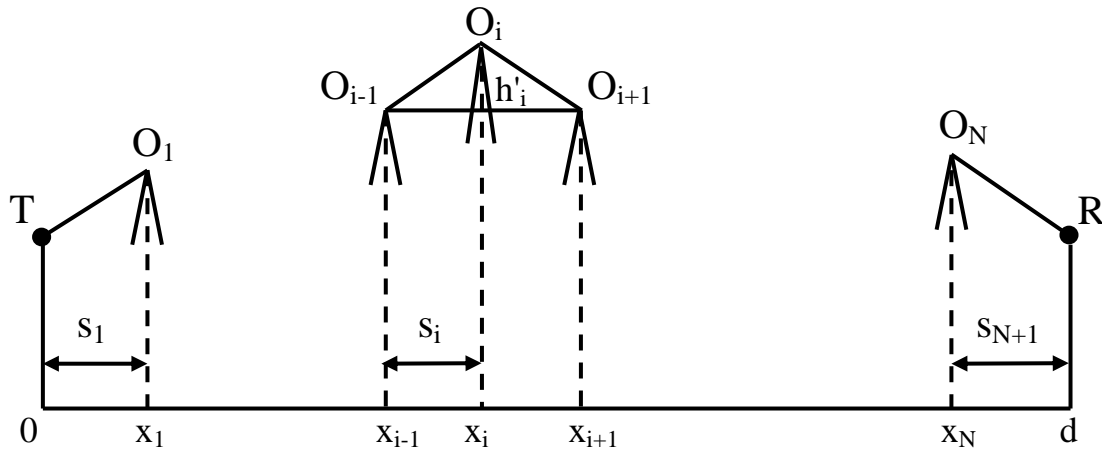


Figura 8.4. Ejemplo del modelo UIT R-526 [28]

También se pueden apreciar obstáculos de menor altura en torno al dominante,  $O_{i-1}$  y  $O_{i+1}$ , donde la línea de unión entre estos marcará la altura relativa,  $h'_i$ , con  $O_i$ . El término  $x_i$  identifica la abscisa del obstáculo principal,  $S_i = x_i - x_{i-1}$  hace referencia a la distancia entre el obstáculo dominante y el adyacente  $O_{i-1}$ ,  $S_1 = x_1$  equivale a la distancia entre el transmisor y el primer obstáculo, y  $S_{n+1} = d - x_N$  muestra la distancia entre el receptor y el último obstáculo.

En la Ecuación 16 se muestra la forma de cálculo de las pérdidas asociadas a UIT R-526.

$$L_N = \sum_{i=1}^N L_D(O_{i-1}O_iO_{i+1}) + \sum_{i=1}^N L_{SD}(v_i) + L_C = \sum_{i=1}^N L_D(v'_i) + \sum_{i=1}^N L_{SD}(v_i) + L_C$$

$$v'_i = f(h'_i) = h'_i \sqrt{\frac{2(S_i + S_{i+1})}{\lambda \cdot S_i \cdot S_{i+1}}}$$

$$L_C = 10 \log_{10} \frac{(S_1 + S_2)(S_2 + S_3) \cdots (S_N + S_{N+1})}{S_2 \cdots S_N (S_1 + S_2 + \cdots + S_{N+1})}$$

Ecuación 16

### *Apartado 8 – Estudio modelos de propagación.*

Tenemos distintos factores en la ecuación 16.  $L_D$  se refiere a las pérdidas producidas por la difracción en el obstáculo dominante  $O_i$ .  $L_{SD}$  son las pérdidas asociadas a obstáculos en el subvano  $O_{i-1}$ ,  $O_i$ ,  $O_{i+1}$  que se sitúan por debajo de la línea que une  $O_{i-1}$  y  $O_{i+1}$  con despejamiento insuficiente. Además, sólo se considerará un único obstáculo para  $L_{SD}$ , el que presente unas pérdidas mayores (un parámetro  $v_i$  más elevado). El último sumando se debe al factor de corrección de Millington ( $L_C$ ), el cual sólo será aplicado si cada valor  $L_D$  es mayor de 15 dB [28].

## 9. ESTUDIO DE LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE LOS ENODOS B EN LOS ENTORNOS ESTUDIADOS

En este apartado mostramos el resultado final de todo el proceso que conlleva la planificación de una red LTE, la ubicación de las estaciones base de nuestros sistemas.

De nuevo, primero mostraremos el despliegue llevado a cabo en el área urbana y, posteriormente, el de la zona rural. Los tres casos considerados en ambos entornos son los que aparecen en la parte inferior.

- Caso 1:

- Modulación → QPSK
- Configuración MIMO → 2 x 2
- Índice CQI → 6

- Caso 2:

- Modulación → 16-QAM
- Configuración MIMO → 2 x 2
- Índice CQI → 8

- Caso 3:

- Modulación → 64-QAM
- Configuración MIMO → Sin MIMO
- Índice CQI → 13

### 9.1. ENTORNO URBANO

Tal y como se precisó en la Tabla 7.19, el dimensionamiento según volumen de tráfico es el que nos proporciona un caso más desfavorable en cuanto a número de eNodos B se refiere. Por esto, el número de emplazamientos que tendremos en cada uno de los tres casos de interés es:

Número de eNodos B	
<b>Caso 1</b>	10
<b>Caso 2</b>	6
<b>Caso 3</b>	5

**Tabla 9.1. Número de eNodos B a desplegar en cada uno de los tres casos elegidos del entorno urbano**

Asimismo, para cada uno de estos casos tendremos dos subapartados, dependiendo del modelo de propagación empleado. Recordemos que para el área urbana vamos a considerar, tal y como se comenta en el apartado 8, los modelos COST-231 y Har-Xia-Bertoni.

A menos que se indique lo contrario, los valores empleados para cada emplazamiento se extraen de la Tabla 6.3, referidos al enlace más desfavorable, y son los siguientes:

- PIRE = 10 dBm
- Pérdidas en recepción ( $L_r$ ) = 3 dB
- Ganancia en recepción ( $G_r$ ) = 17 dB
- Sensibilidad ( $S$ ) = -111,435 dBm
- Altura eNodo B ( $h_{tx}$ ) = 30 m.

El valor de PIRE elegido es inferior al considerado en el balance del enlace más desfavorable, 20 dBm, ya que en ese caso el solapamiento presente en las coberturas resulta elevado. Las pérdidas de recepción se asignan a 3 dB porque lo tomamos como la suma de las pérdidas en el cable (2 dB) y el margen de interferencia (1 dB).

Además, realizaremos variaciones en el ángulo de elevación,  $\varphi$ , para ajustar correctamente las coberturas en cada situación.

### 9.1.1. CASO 1 – QPSK, MIMO 2 x 2, CQI =6

Los diez eNodos B que hay que desplegar en este caso tendrán la siguiente ubicación:

COORDENADAS		
	X (m)	Y (m)
<b>eNodo B 1</b>	3690660	5338739
<b>eNodo B 2</b>	3691289	5338732
<b>eNodo B 3</b>	3691957	5338786
<b>eNodo B 4</b>	3690495	5338285
<b>eNodo B 5</b>	3691039	5338299
<b>eNodo B 6</b>	3691482	5338174

eNodo B 7	3692061	5338271
eNodo B 8	3690617	5337831
eNodo B 9	3691267	5337685
eNodo B 10	3692040	5337731

**Tabla 9.2. Coordenadas de la ubicación de los eNodos B para el caso 1**

### 9.1.1.1. UBICACIÓN BASADA EN EL USO DEL MODELO DE PROPAGACIÓN COST-231

Para cada uno de los emplazamientos, mostraremos la cobertura individual otorgada por cada sector, así como la cobertura proporcionada por el eNodo B considerando los tres sectores de manera conjunta. Para obtener en RadioGIS la cobertura conjunta de los tres sectores, realizamos un cálculo de un sistema de cobertura que incluye las tres coberturas individuales, las cuales han sido calculadas con anterioridad.

De manera que haya el menor solapamiento posible entre células, el ángulo elevación empleado en todos los sectores de todos los emplazamientos es de 15 grados.

En la Tabla 9.3 presentamos una tabla resumen de la configuración empleada en cada sector para estos 10 emplazamientos. En algunos casos reduciremos la PIRE para evitar mayores solapes entre células.

		Acimut ( $\theta$ )	Elev ( $\varphi$ )	H <sub>TX</sub> (m)	PIRE (dBm)	G <sub>r</sub> (dB)	L <sub>r</sub> (dB)	S (dBm)
eNodo B 1	Sector 1	0°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	15°	30	10	17	3	-111,435
eNodo B 2	Sector 1	0°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	15°	30	10	17	3	-111,435
eNodo B 3	Sector 1	0°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	15°	30	10	17	3	-111,435

<b>eNodo B 4</b>	<b>Sector 1</b>	0°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	15°	30	5	17	3	-111,435
<b>eNodo B 5</b>	<b>Sector 1</b>	0°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	15°	30	5	17	3	-111,435
<b>eNodo B 6</b>	<b>Sector 1</b>	0°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	15°	30	5	17	3	-111,435
<b>eNodo B 7</b>	<b>Sector 1</b>	0°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	15°	30	5	17	3	-111,435
<b>eNodo B 8</b>	<b>Sector 1</b>	0°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	15°	30	5	17	3	-111,435
<b>eNodo B 9</b>	<b>Sector 1</b>	340°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	100°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	220°	15°	30	5	17	3	-111,435
<b>eNodo B 10</b>	<b>Sector 1</b>	40°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	160°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	280°	15°	30	5	17	3	-111,435

**Tabla 9.3. Configuración para cada sector del caso 1 en RadioGIS, usando el modelo COST-231**

De la Figura 9.1 a la 9.40 observamos las citadas coberturas.

### Emplazamiento 1



**Figura 9.1. Cobertura de primer sector (0°) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**

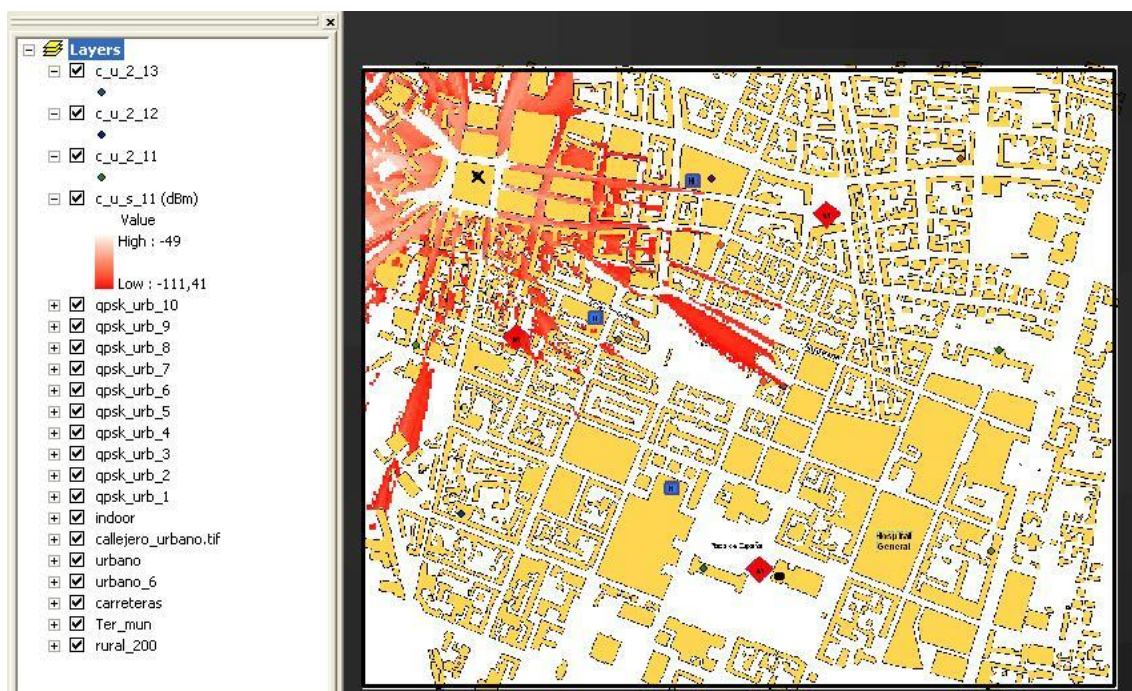


**Figura 9.2. Cobertura de segundo sector (120°) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**





**Figura 9.3. Cobertura de tercer sector (240°) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



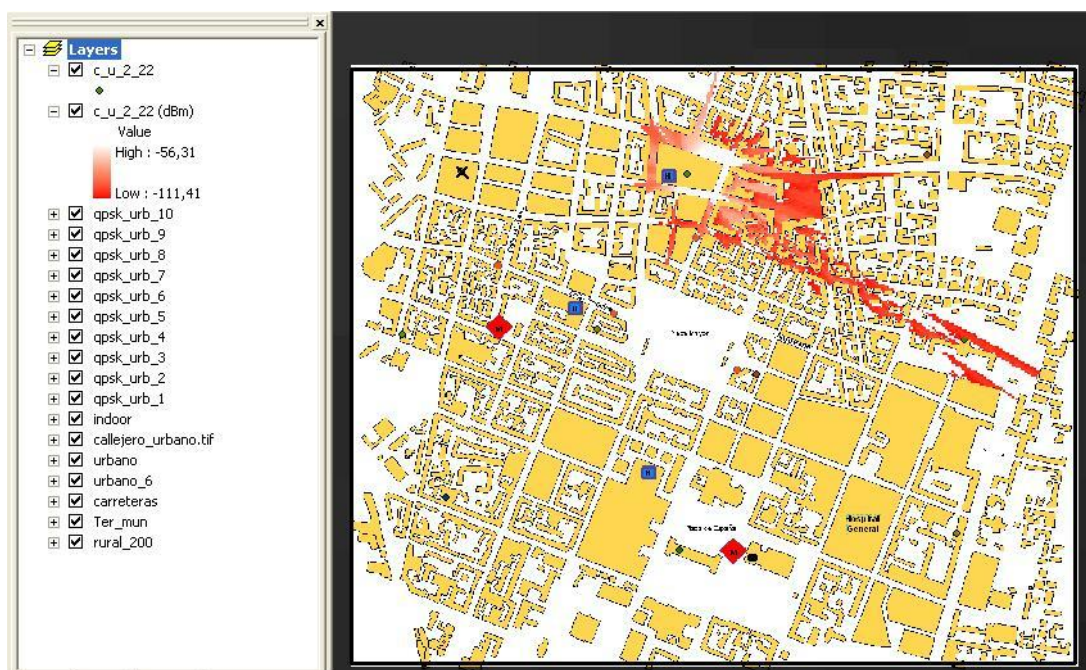
**Figura 9.4. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 2

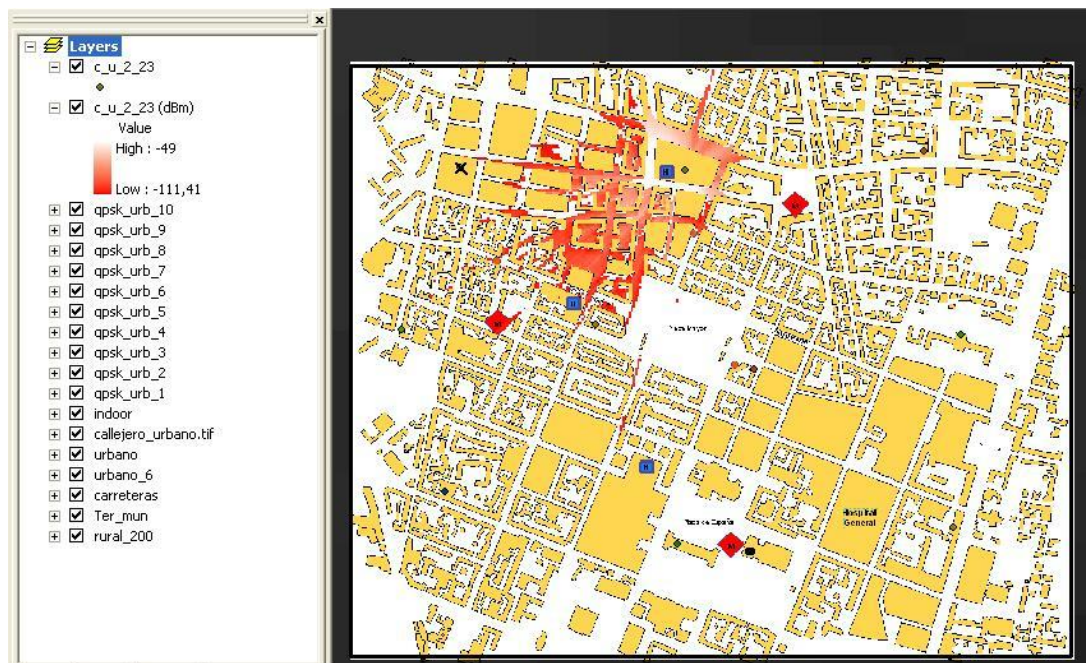


**Figura 9.5. Cobertura de primer sector (0°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**

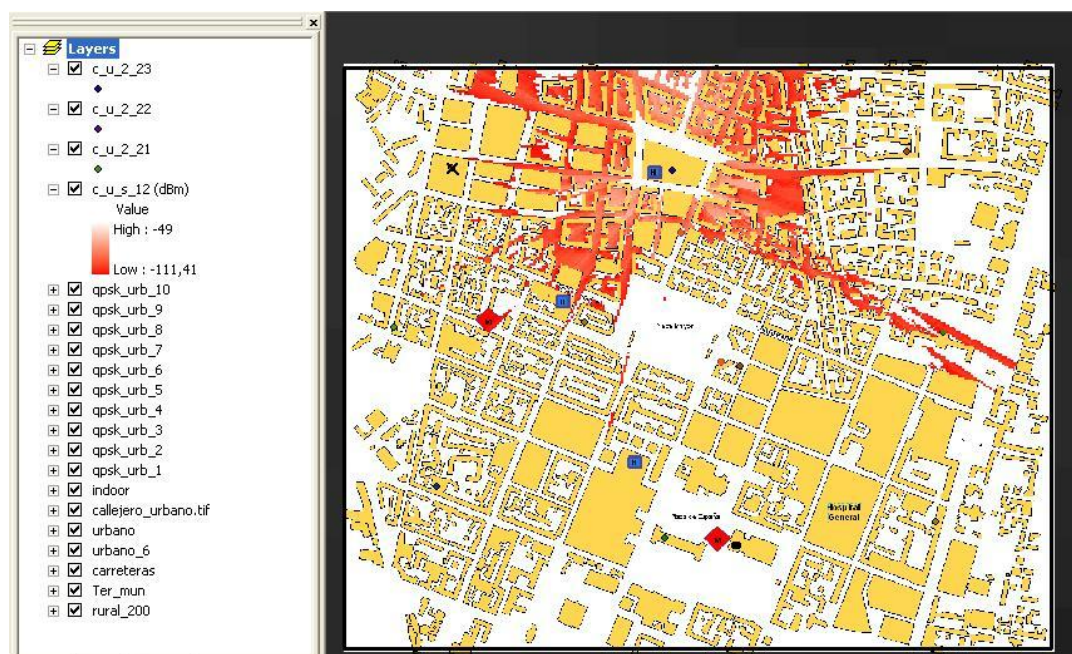


**Figura 9.6. Cobertura de segundo sector (120°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**





**Figura 9.7. Cobertura de tercer sector (240°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.8. Cobertura total proporcionada por segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 3

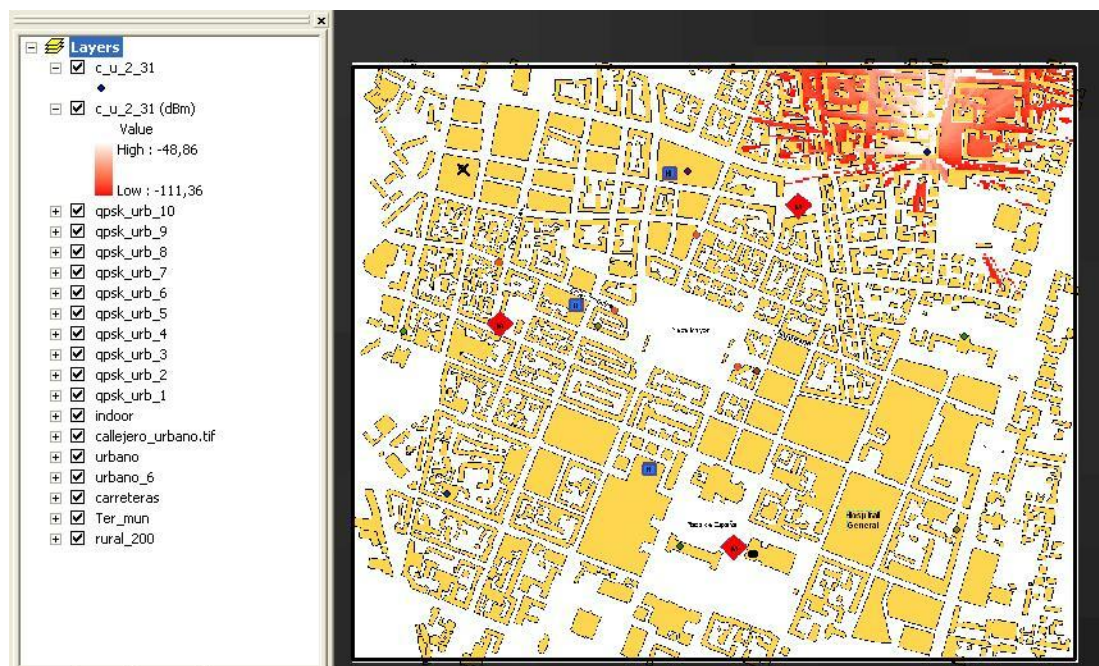


Figura 9.9. Cobertura de primer sector (0°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231

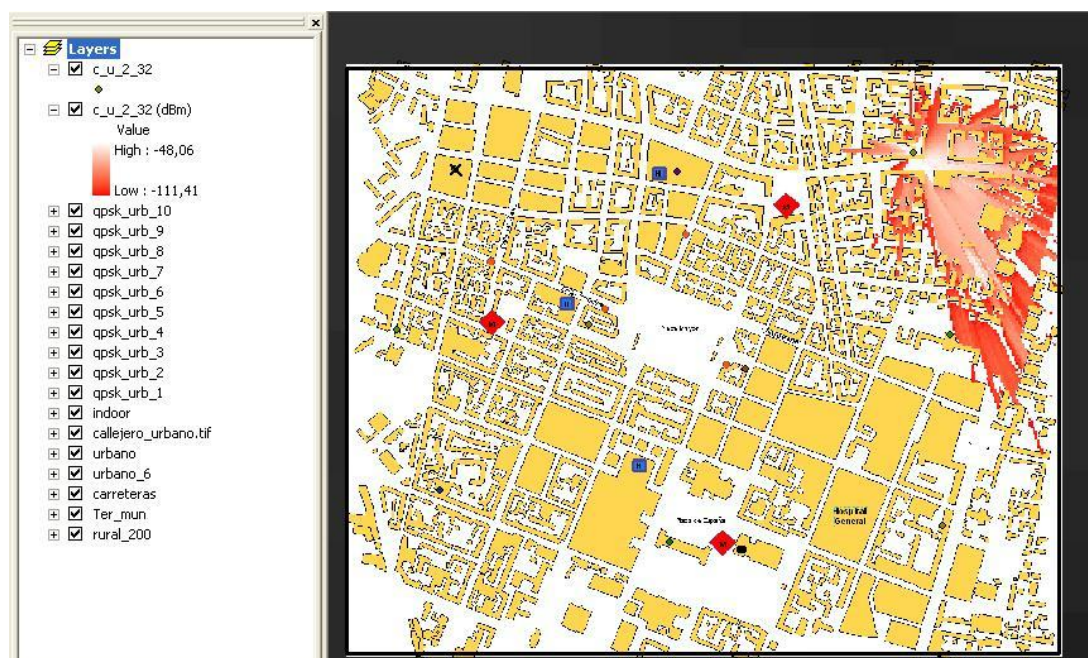
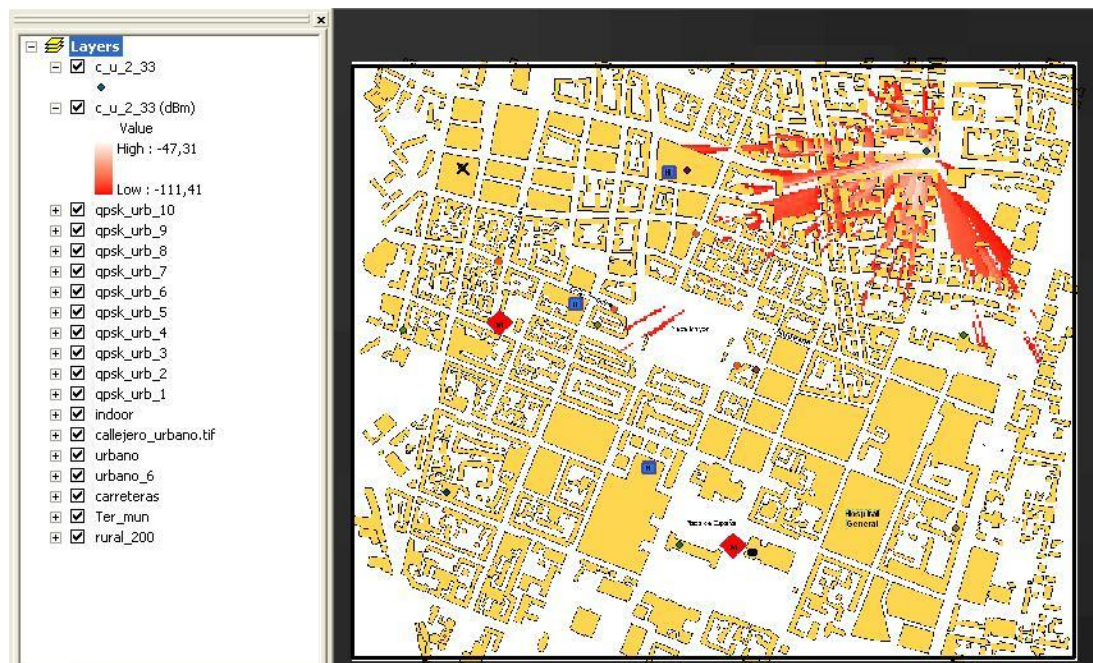
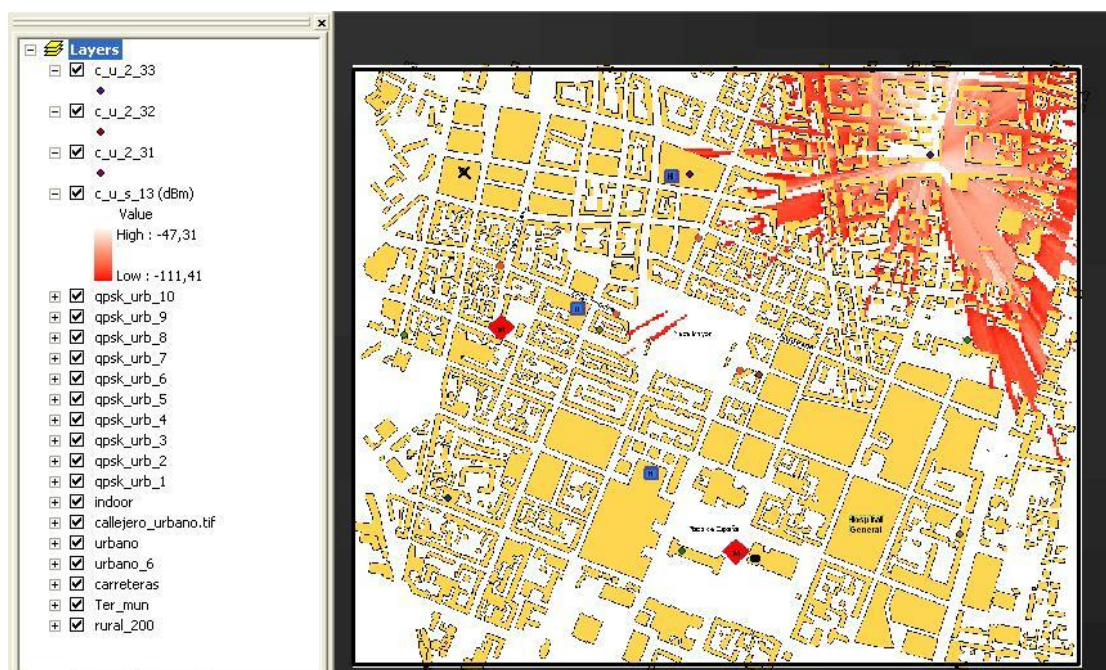


Figura 9.10. Cobertura de segundo sector (120°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231





**Figura 9.11. Cobertura de tercer sector (240°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.12. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 4

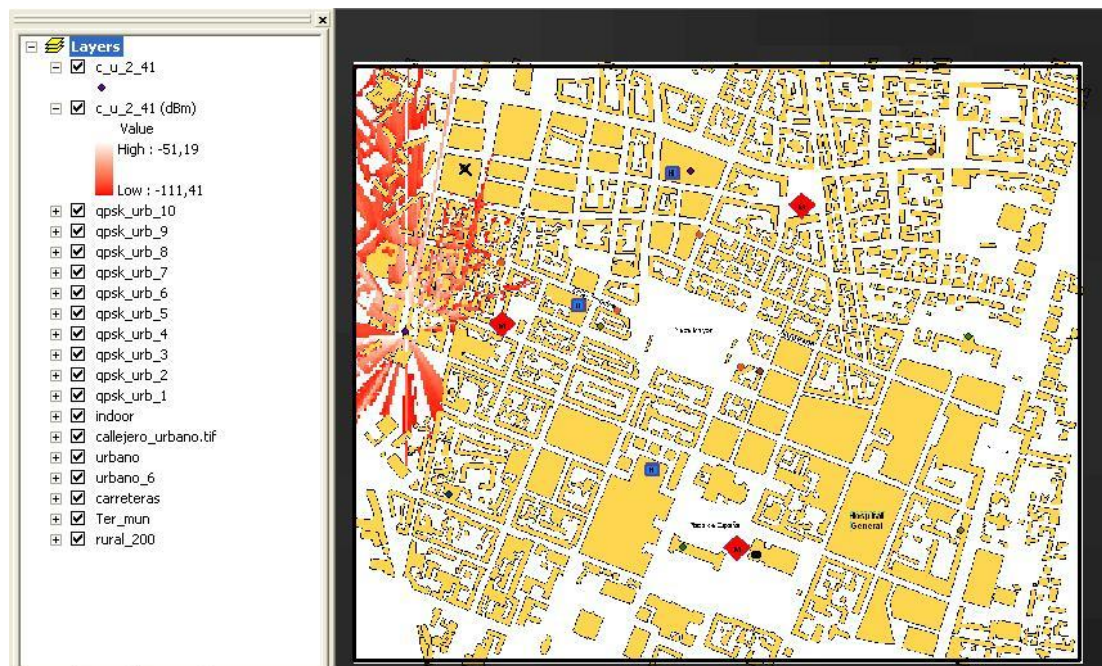


Figura 9.13. Cobertura de primer sector ( $0^\circ$ ) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231

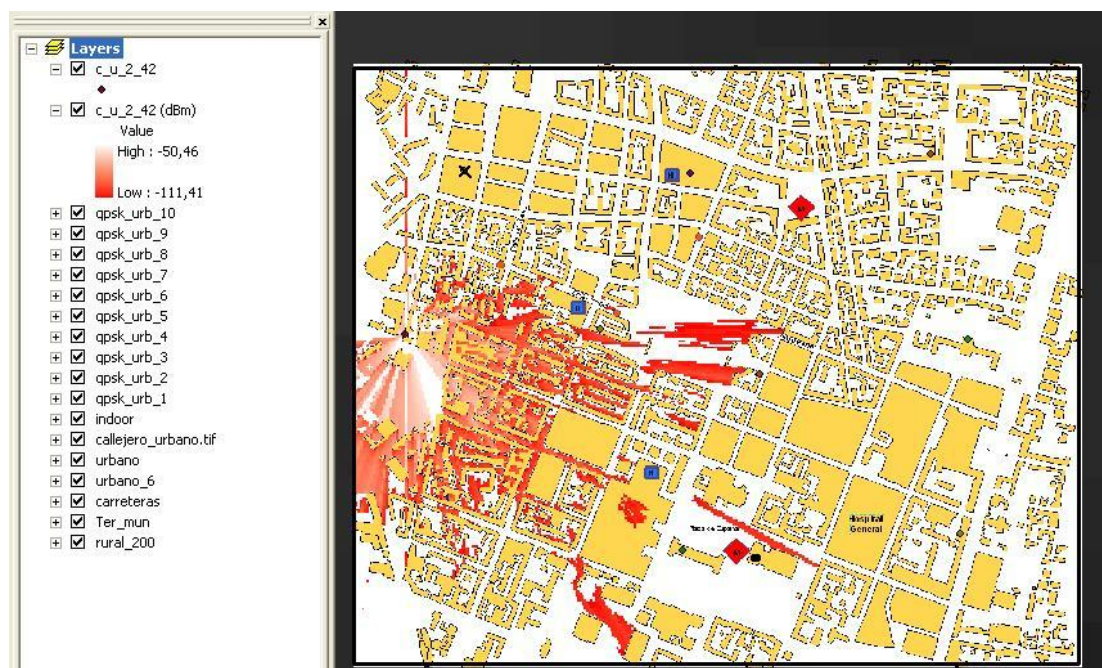
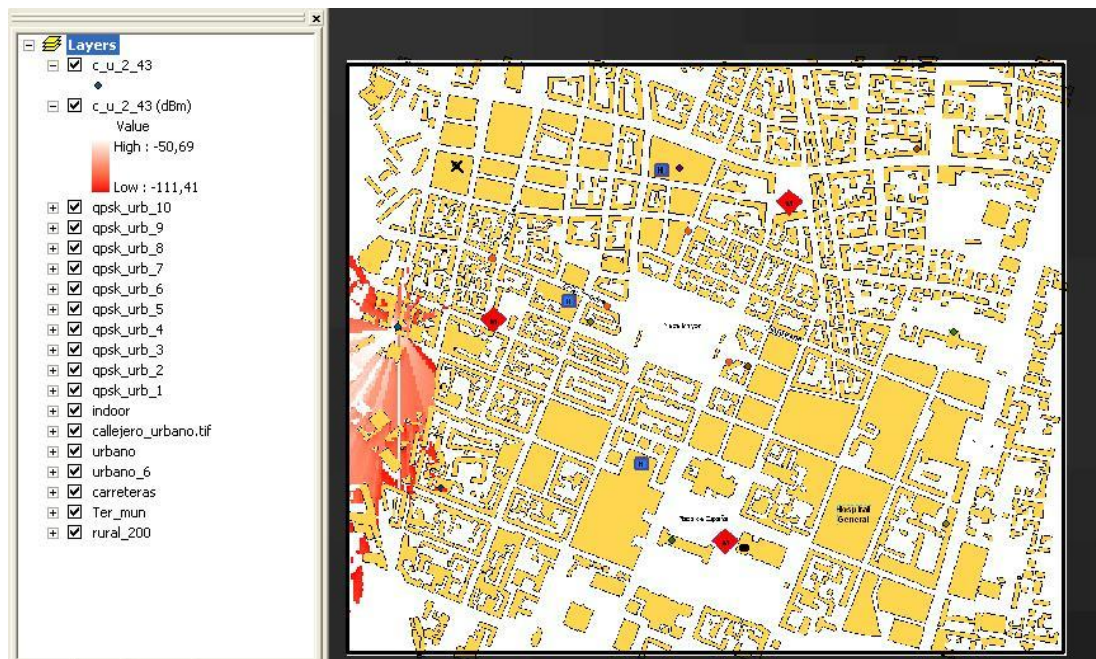
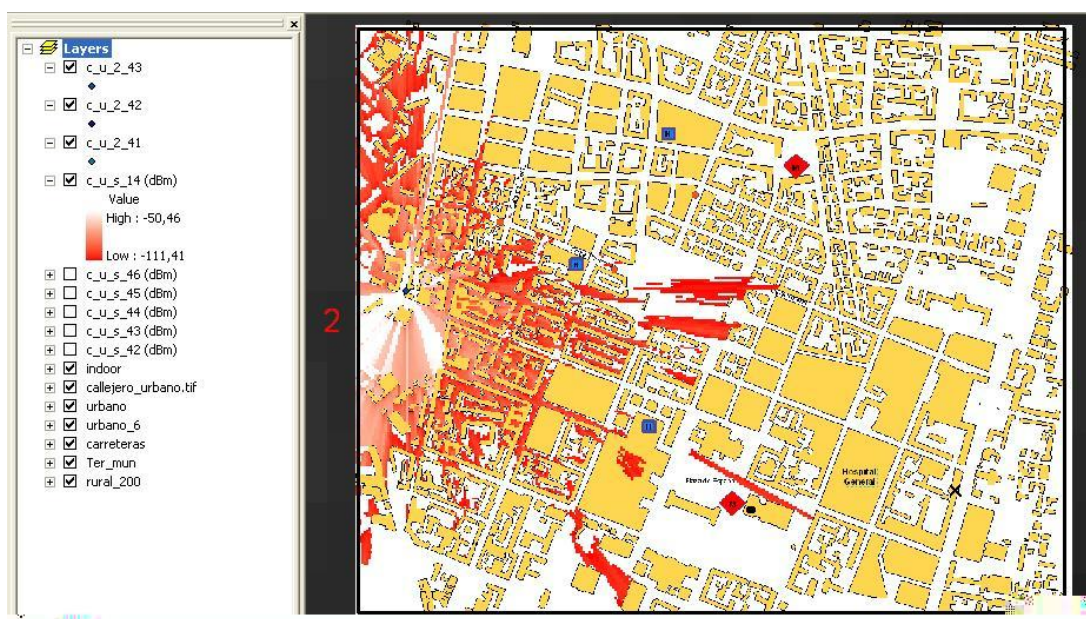


Figura 9.14. Cobertura de segundo sector ( $120^\circ$ ) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231





**Figura 9.15. Cobertura de tercer sector (240°) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.16. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 5



Figura 9.17. Cobertura de primer sector ( $0^\circ$ ) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231

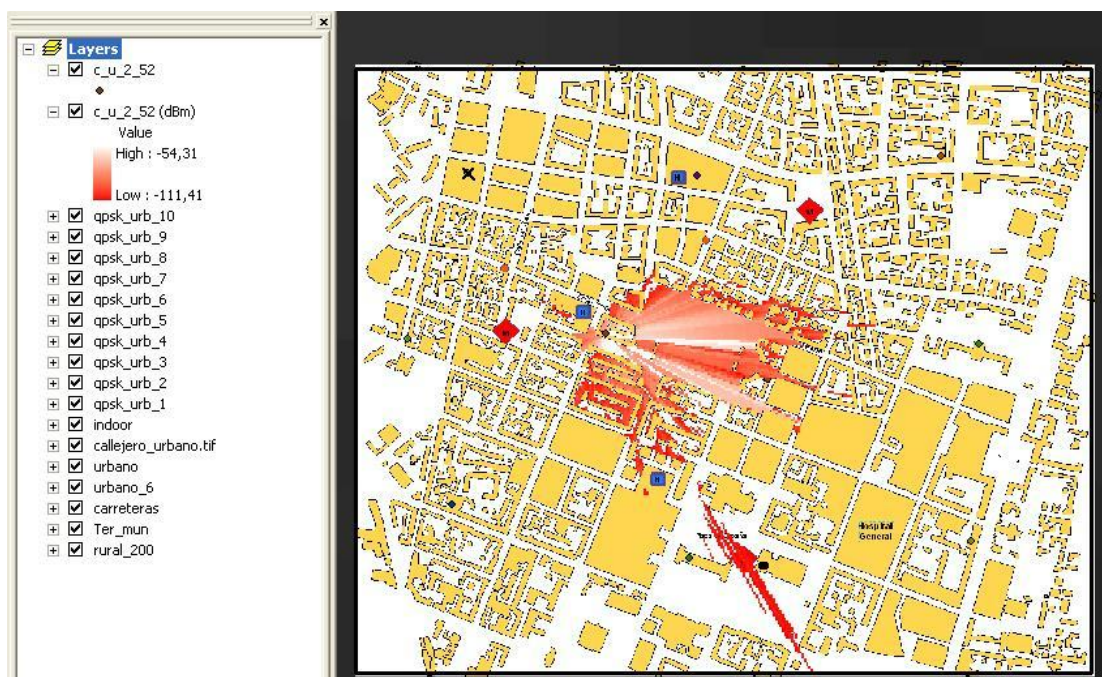
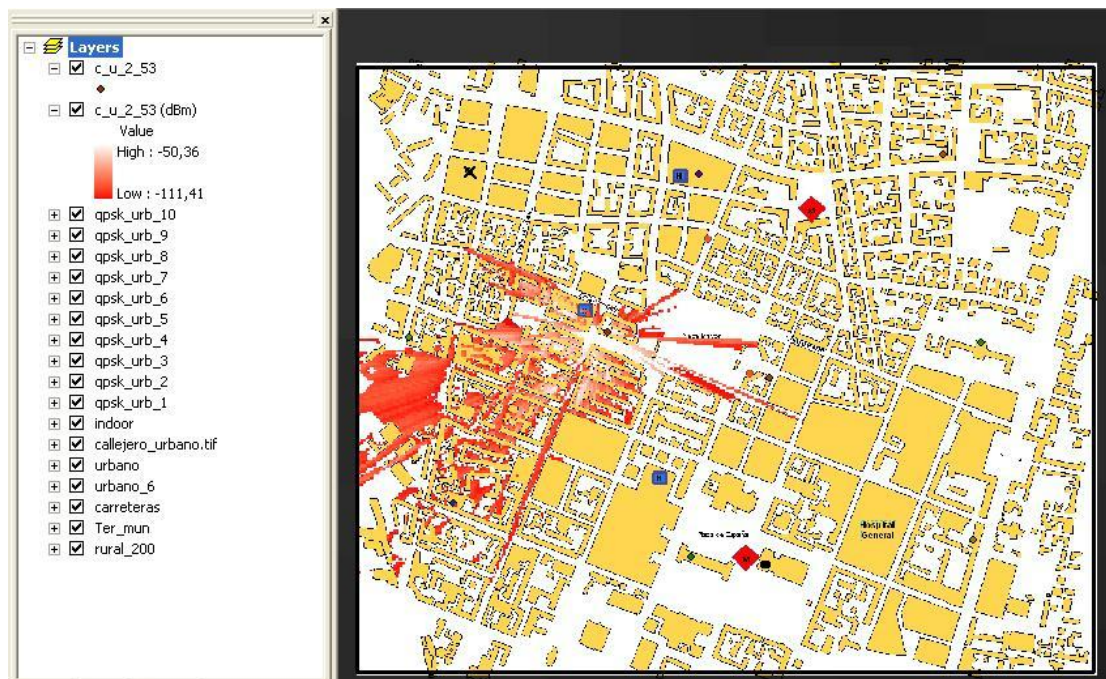
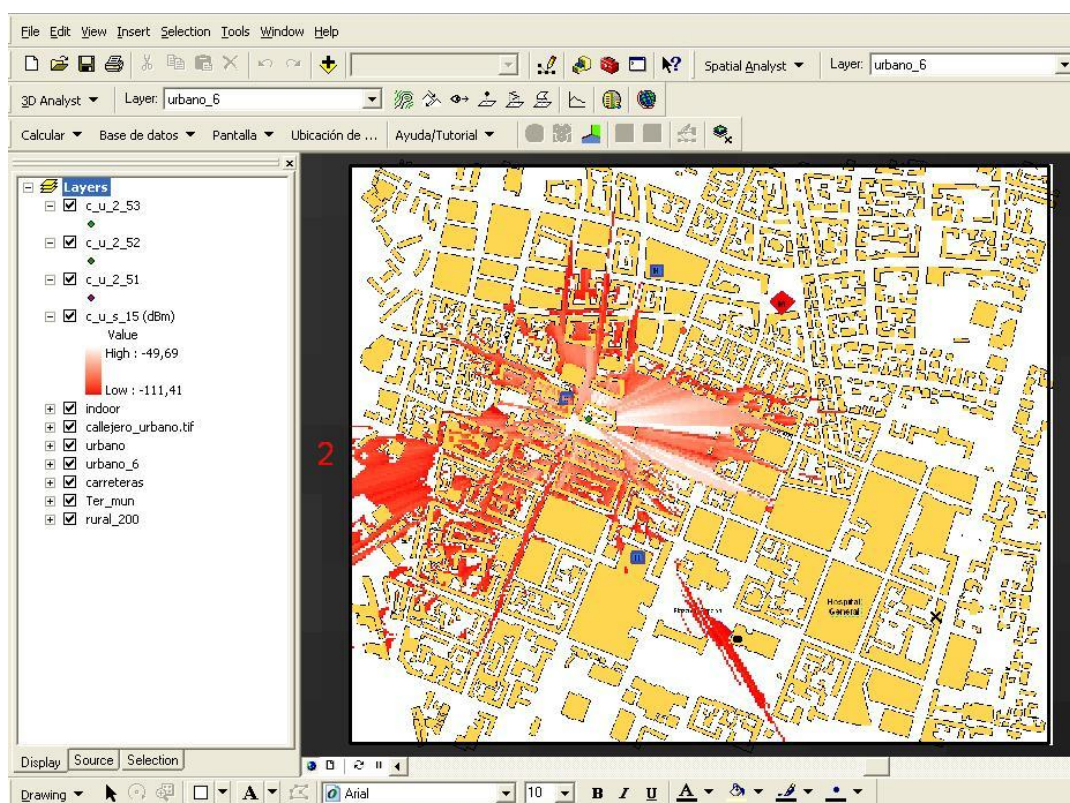


Figura 9.18. Cobertura de segundo sector ( $120^\circ$ ) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231





**Figura 9.19. Cobertura de tercer sector (240°) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.20. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 6

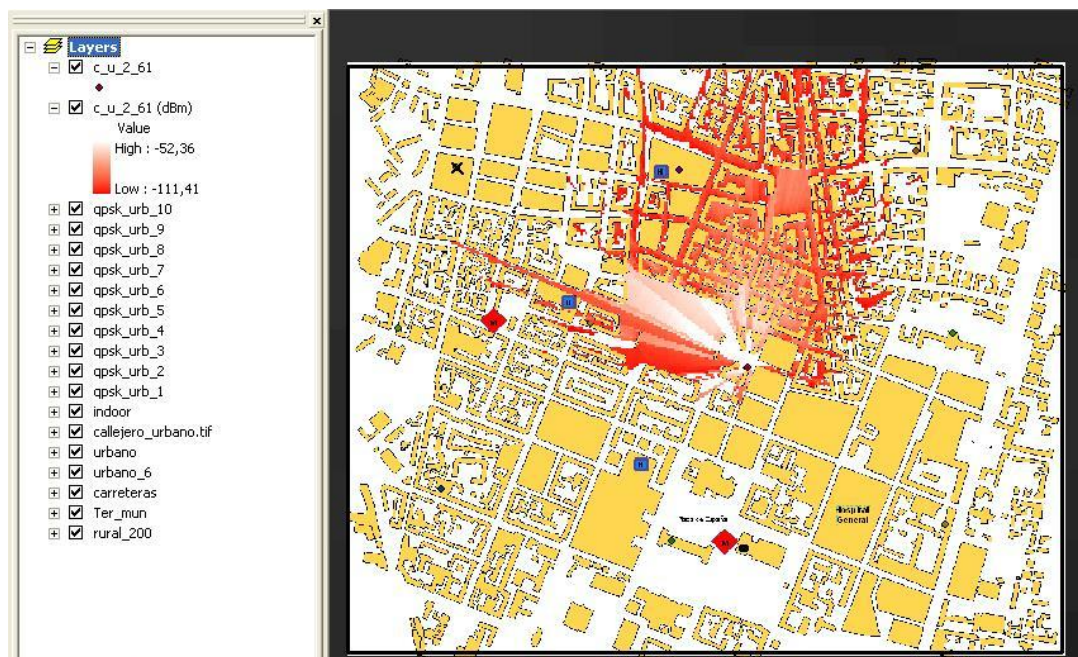


Figura 9.21. Cobertura de primer sector (0°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231

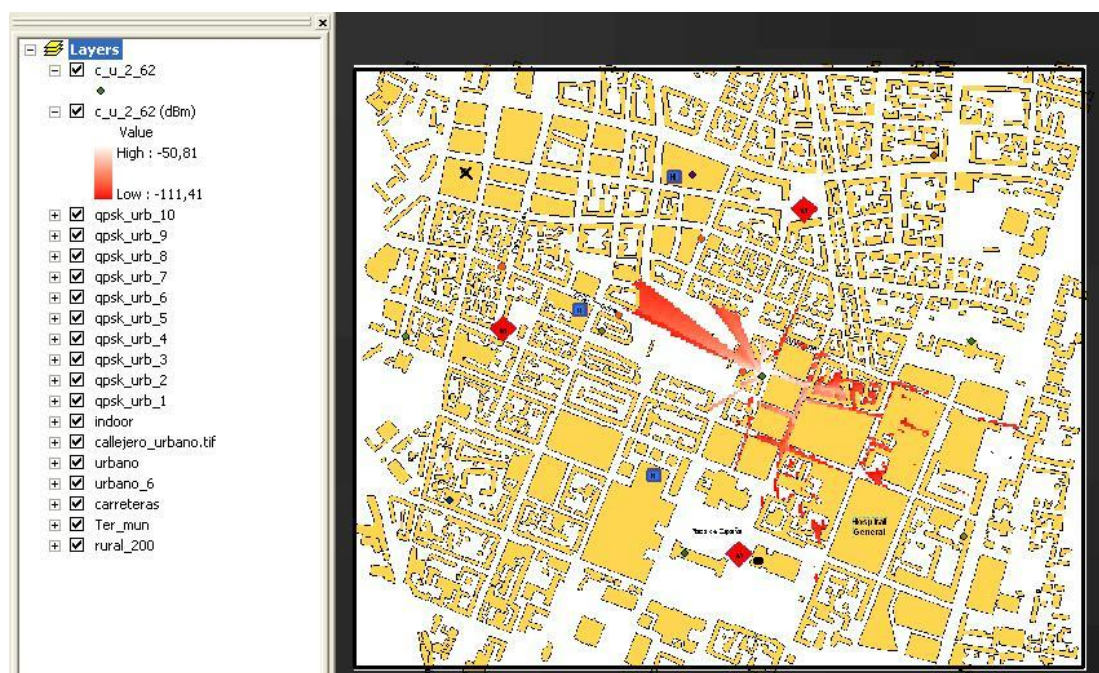
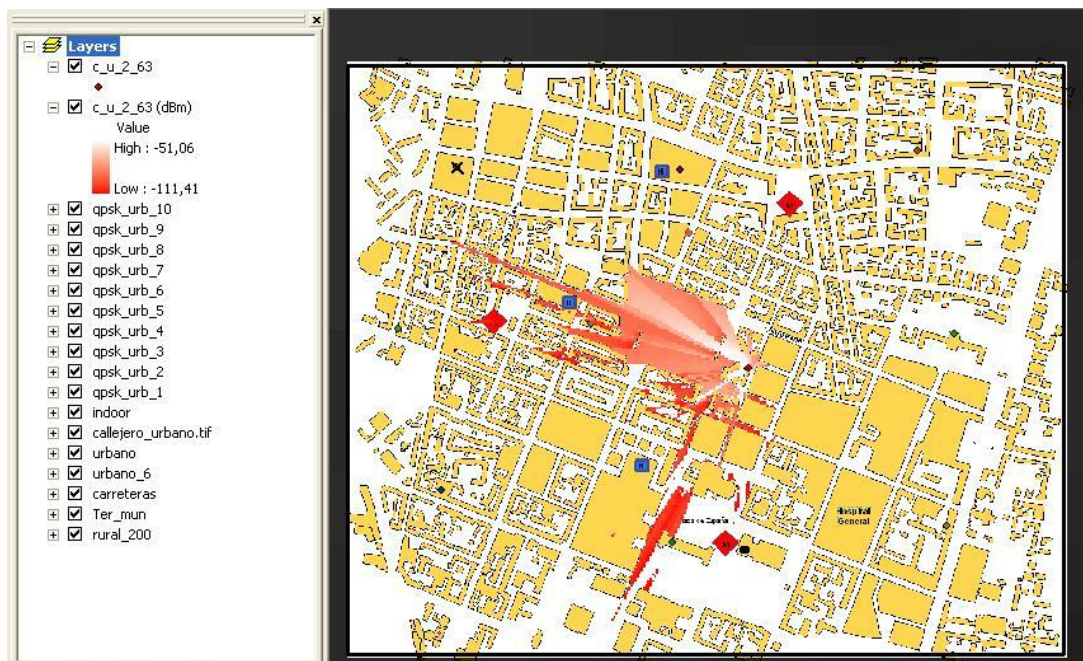
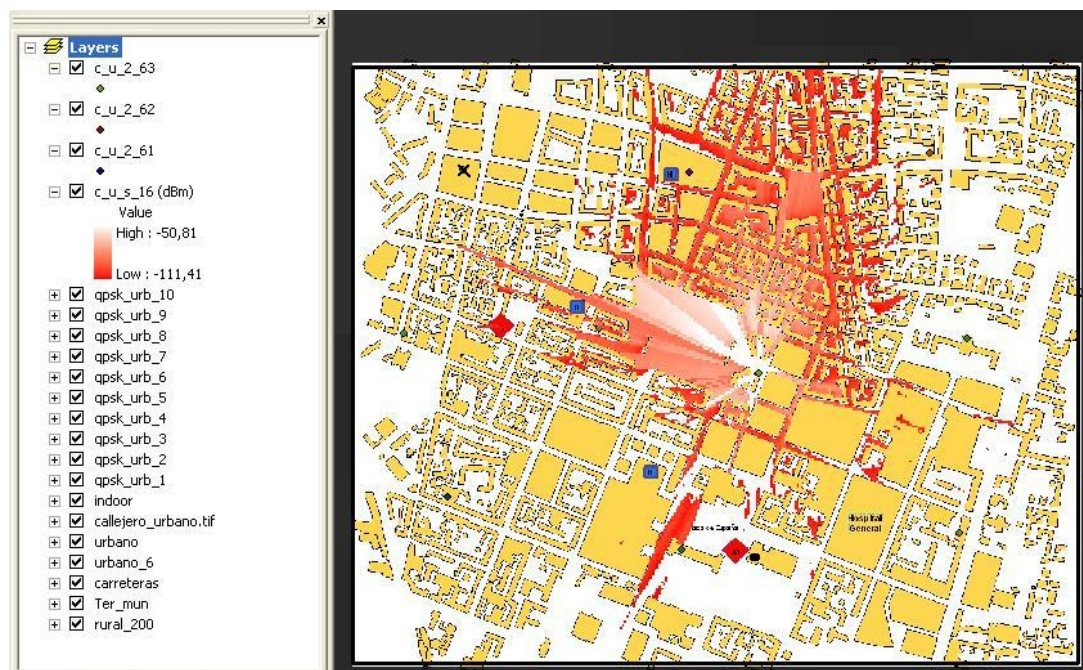


Figura 9.22. Cobertura de segundo sector (120°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231





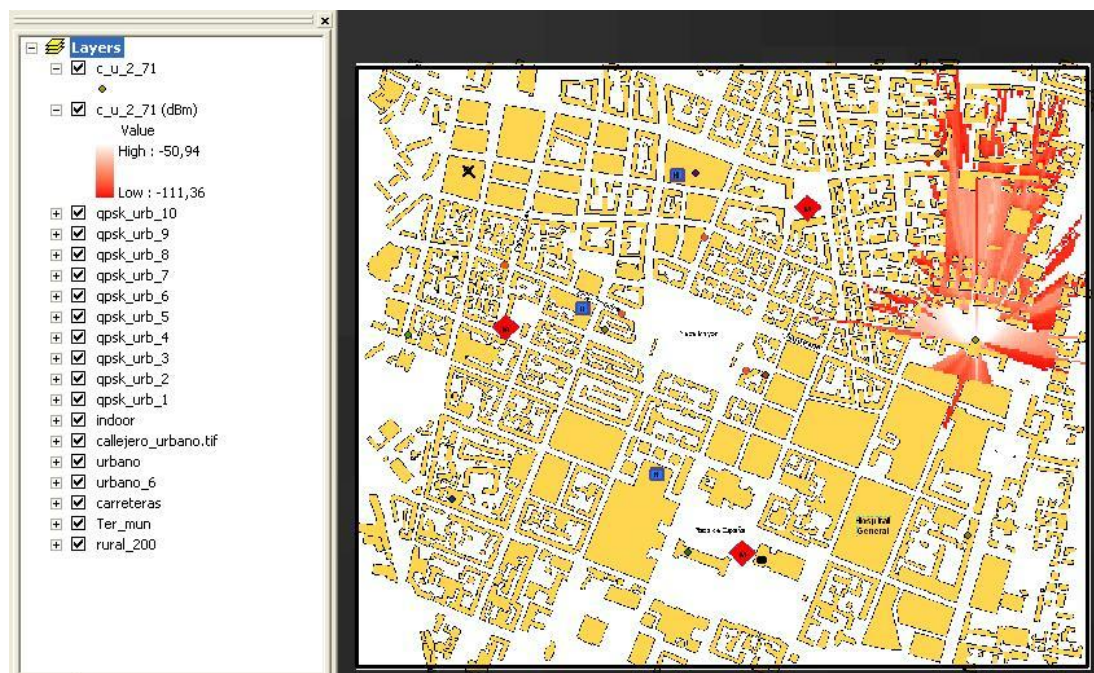
**Figura 9.23. Cobertura de tercer sector (240°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.24. Cobertura total proporcionada por sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 7

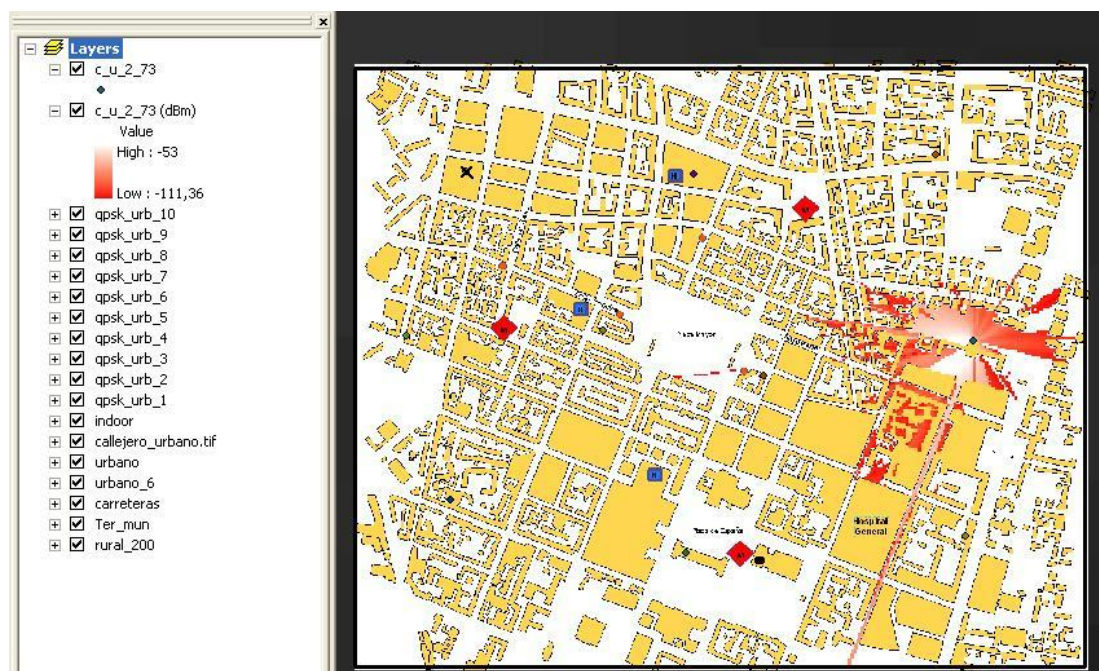


**Figura 9.25. Cobertura de primer sector (0°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**

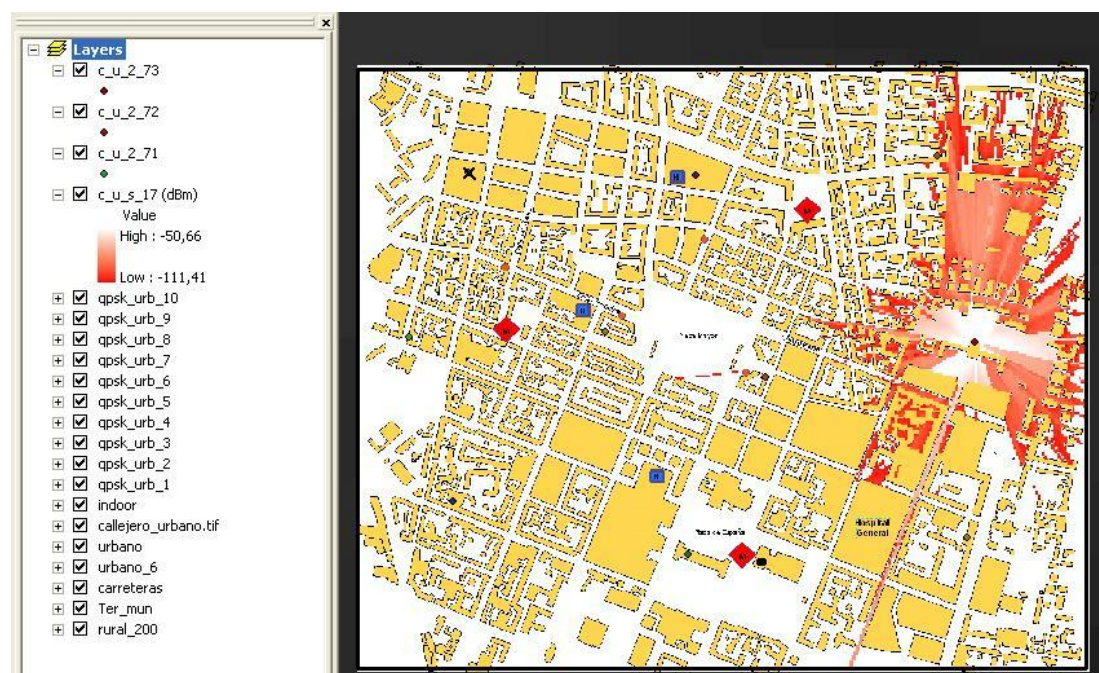


**Figura 9.26. Cobertura de segundo sector (120°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**





**Figura 9.27. Cobertura de tercer sector (240°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.28. Cobertura total proporcionada por séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 8

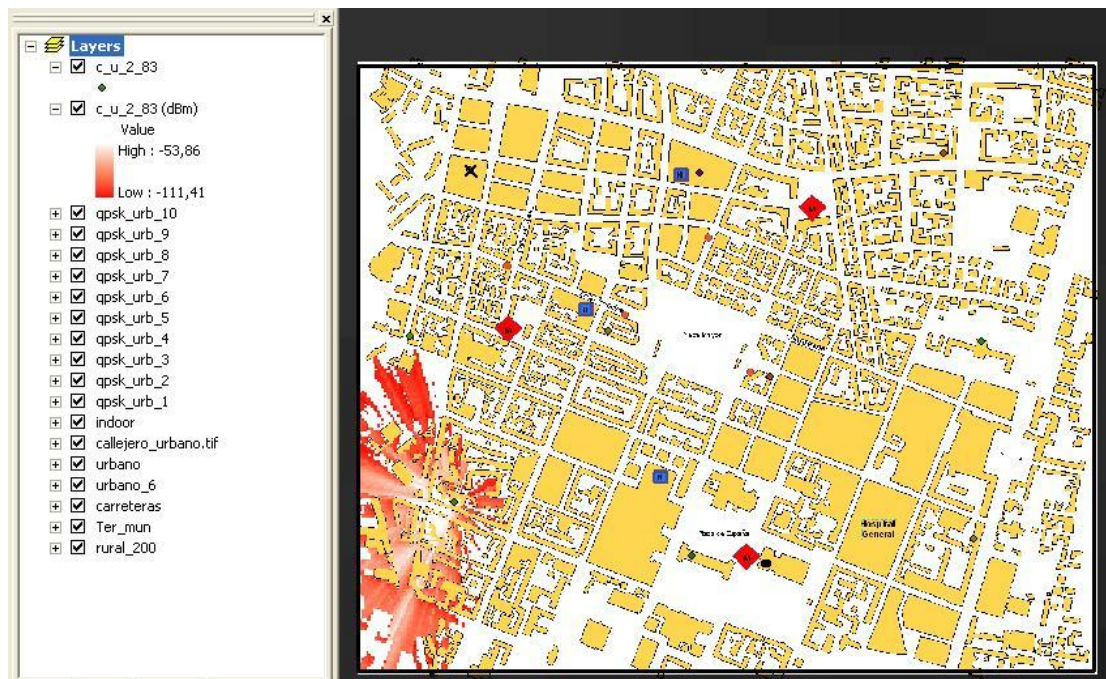


**Figura 9.29. Cobertura de primer sector (0°) de octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.30. Cobertura de segundo sector (120°) de octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**





**Figura 9.31. Cobertura de tercer sector (240°) de octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.32. Cobertura total proporcionada por octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 9

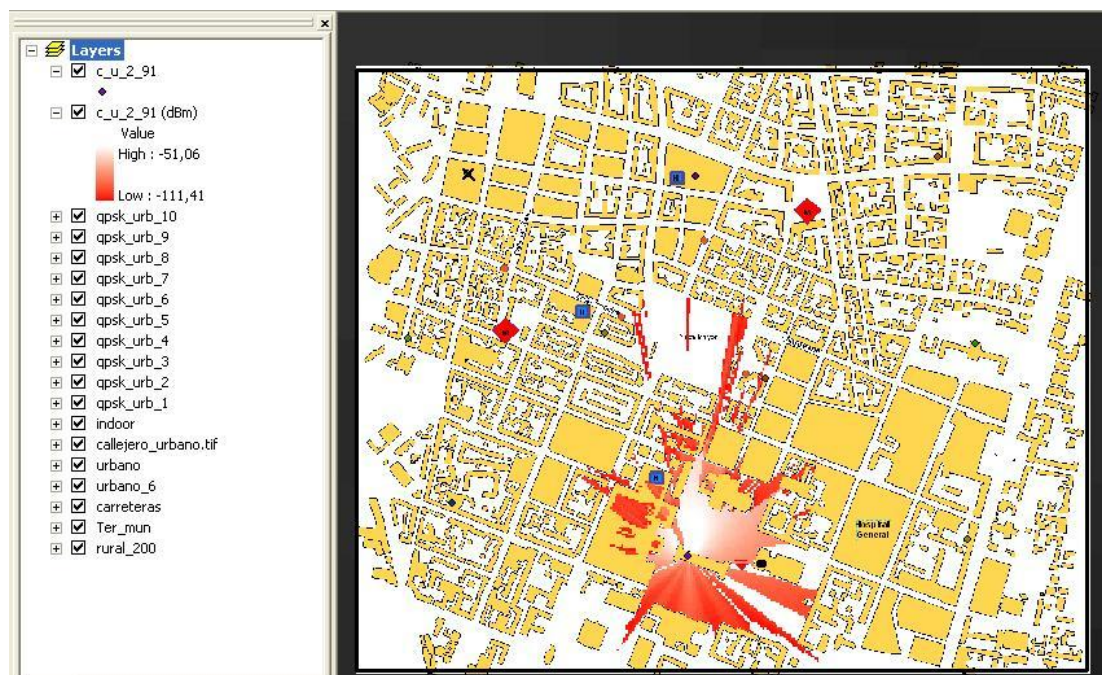


Figura 9.33. Cobertura de primer sector (0°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231

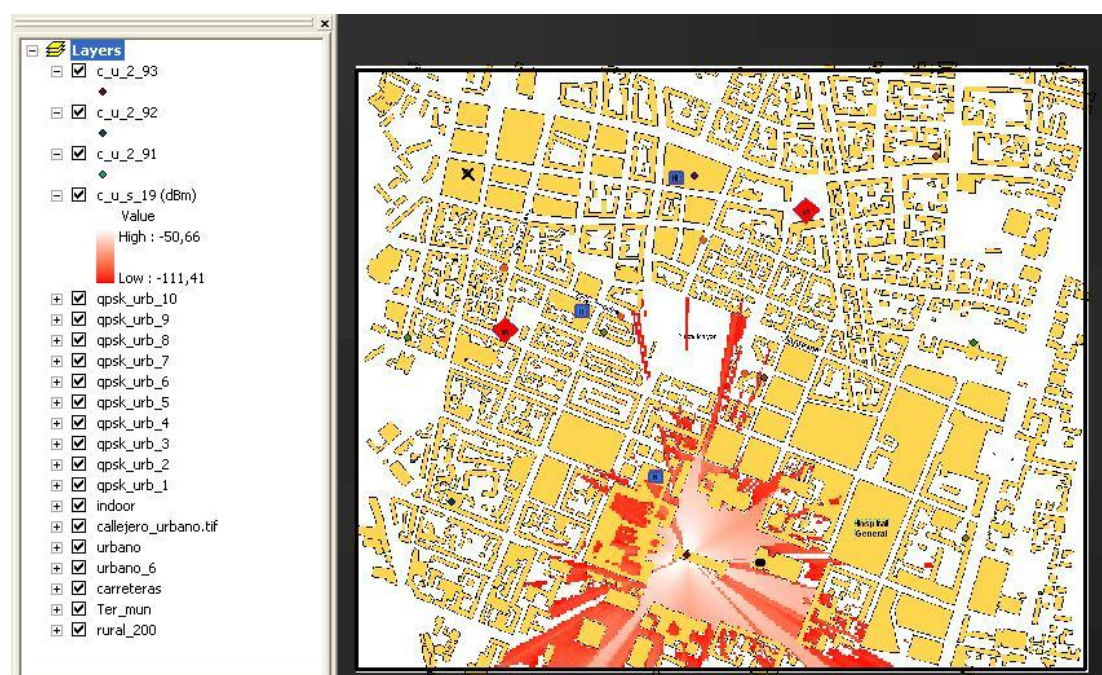


Figura 9.34. Cobertura de segundo sector (120°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231





**Figura 9.35. Cobertura de tercer sector (240°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.36. Cobertura total proporcionada por noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 10

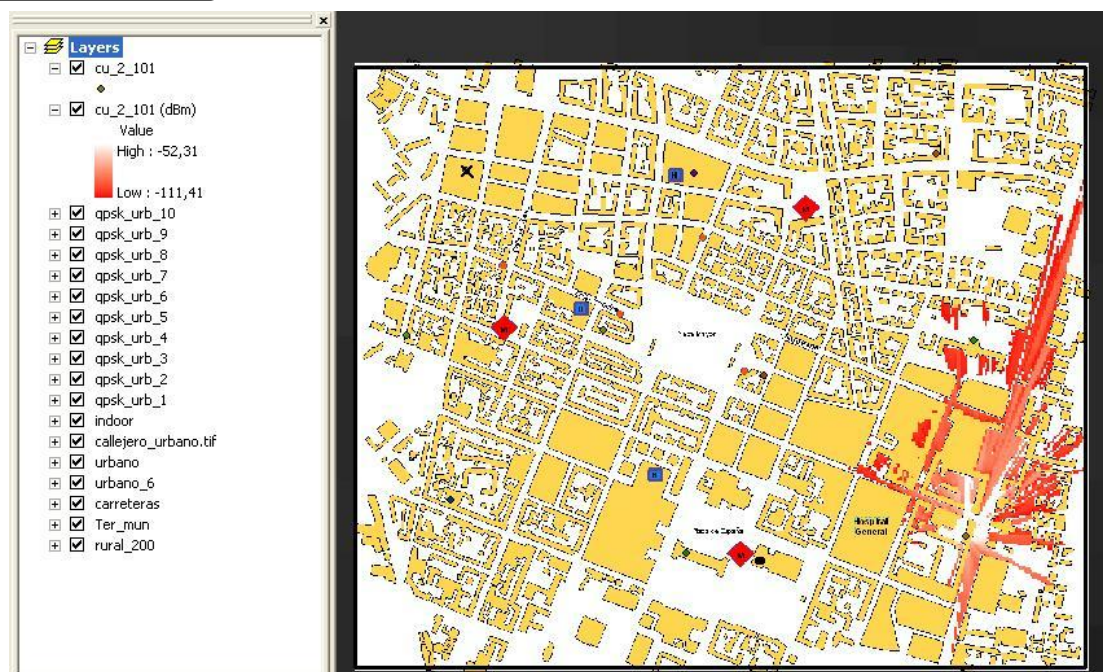
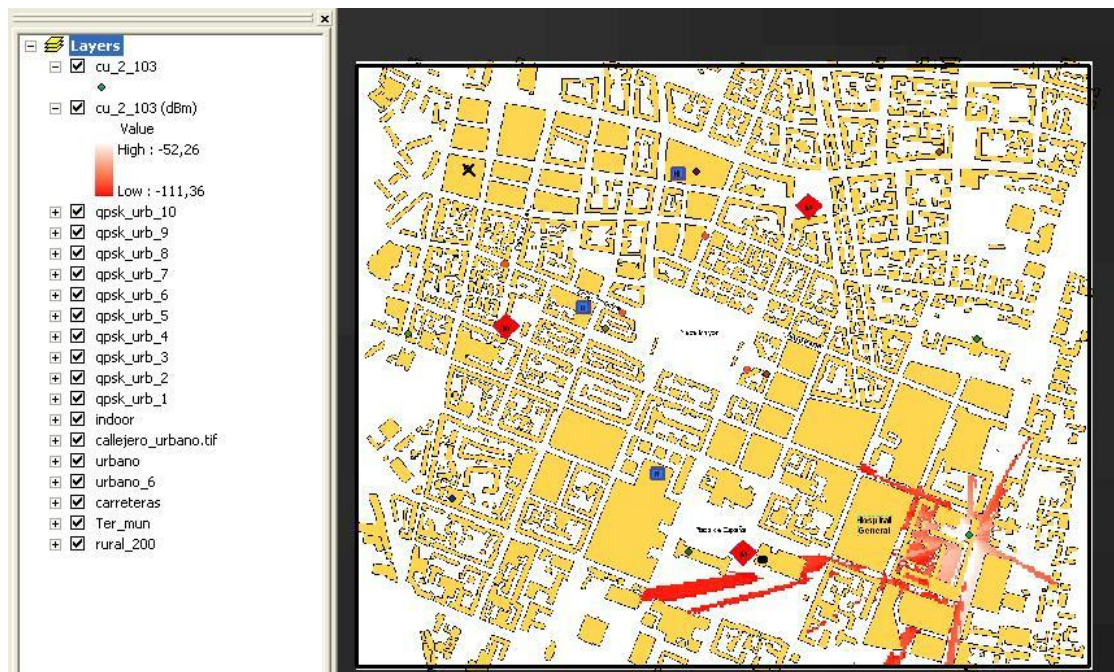


Figura 9.37. Cobertura de primer sector (0°) de décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231



Figura 9.38. Cobertura de segundo sector (120°) de décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231



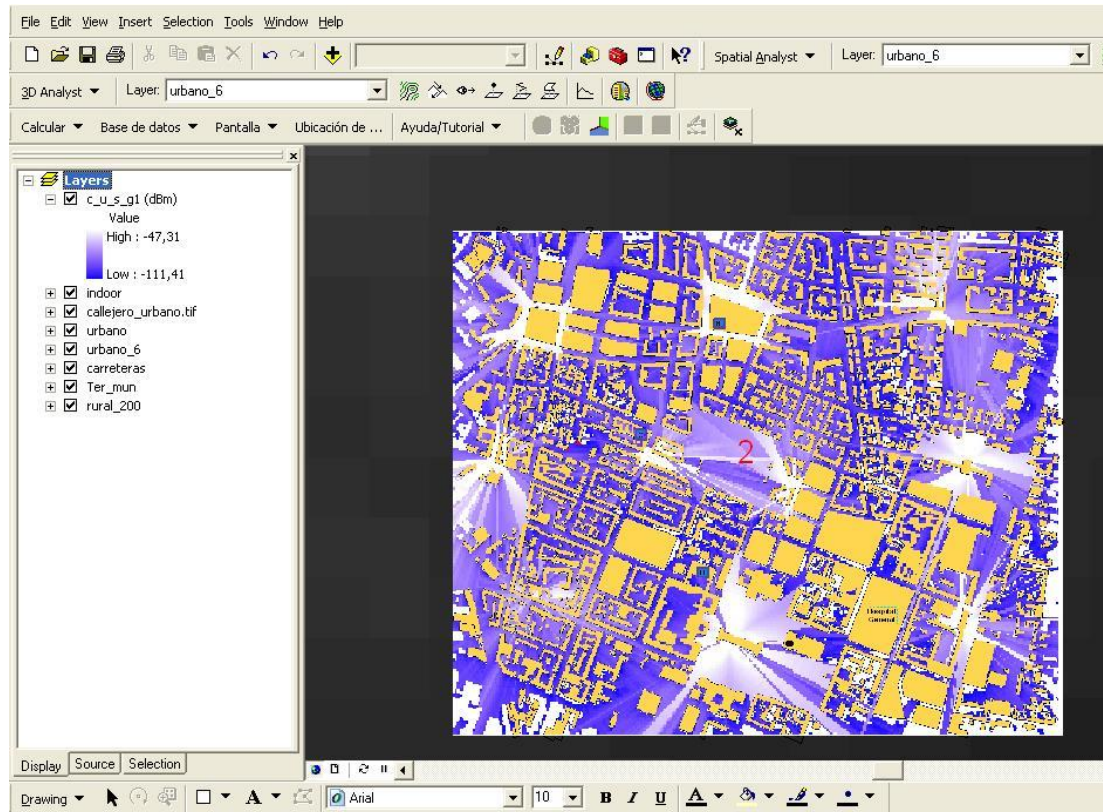


**Figura 9.39. Cobertura de tercer sector (240°) de décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.40. Cobertura total proporcionada por décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con COST-231**

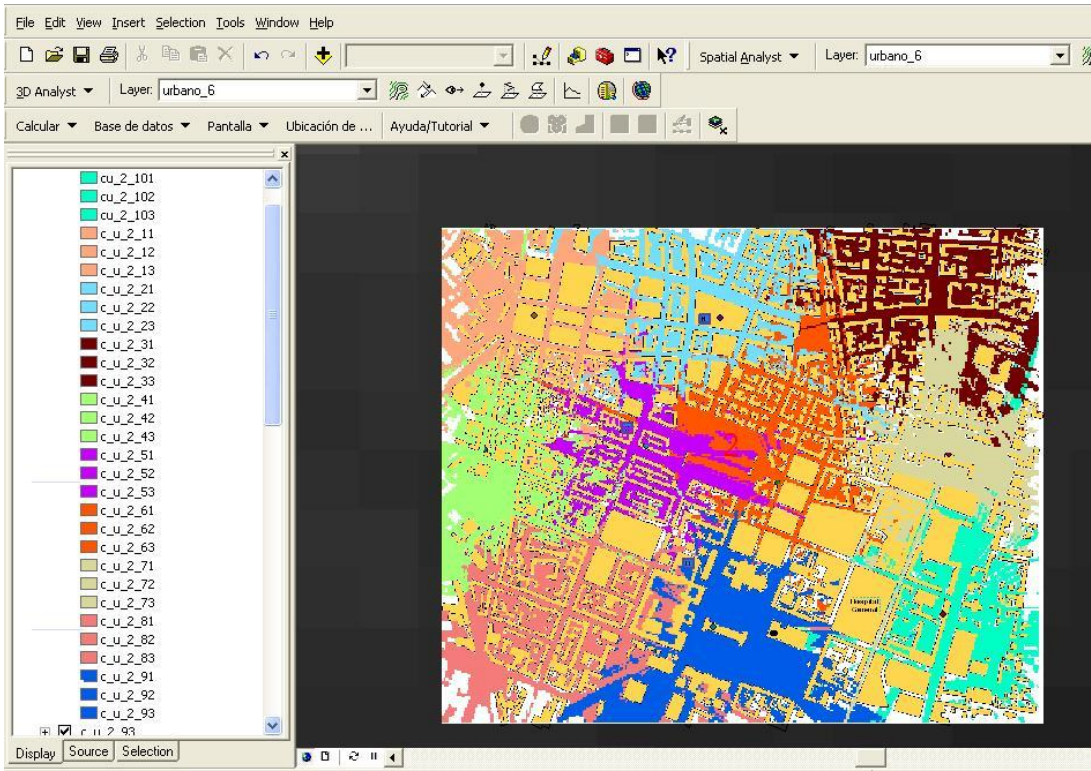
Una vez que hemos obtenido las coberturas de todos los emplazamientos individuales, presentamos en la Figura 9.41 la cobertura dispuesta por todos estos de manera conjunta como un sistema completo.



**Figura 9.41. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 1 en entorno urbano, con COST-231**

Tal y como se comprueba en la Figura 9.41, la totalidad del mapa queda cubierta por los 10 eNodos B dispuestos. En la Figura 9.42 se presenta el mapa de mejor servidor, indicando el emplazamiento que proveerá mejor servicio en cada zona.





**Figura 9.42. Mapa de mejor servidor en el sistema correspondiente al caso 1 en entorno urbano, con COST-231**

En esta última figura observamos la división de colores correspondiente a los 10 eNodos B. Para su realización hemos considerado todas las coberturas individuales calculadas en los pasos precedentes y se le ha asignado el mismo color a las tres coberturas de un mismo emplazamiento. De este modo, obtenemos una mejor visualización con un único color por cada eNodo B.

**9.1.1.2. UBICACIÓN BASADA EN USO DE MODELO DE PROPAGACIÓN HAR-XIA-BERTONI**

Con este modelo se estimarán mayores pérdidas que con COST-231. Esto se debe que Har-Xia-Bertoni incorpora el concepto de punto de ruptura, a partir del cual la obstrucción de la primera zona de Fresnel es elevada y las pérdidas aumentan considerablemente. Con esto, para garantizar de nuevo una cobertura global óptima, modificaremos para cada emplazamiento la PIRE y/o el ángulo de elevación según se considere oportuno. La altura de las estaciones base la dejamos igual, a 30 metros.

En la Tabla 9.4 presentamos la tabla resumen para este modelo.

Acimut ( $\theta$ )	Elev ( $\varphi$ )	H <sub>TX</sub> (m)	PIRE (dBm)	G <sub>r</sub> (dB)	L <sub>r</sub> (dB)	S (dBm)
------------------------	-----------------------	------------------------	---------------	---------------------	---------------------	---------

eNodo B 1	Sector 1	0°	10°	30	15	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	10°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	15°	30	10	17	3	-111,435
eNodo B 2	Sector 1	0°	15°	30	15	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	10°	30	15	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	18°	30	15	17	3	-111,435
eNodo B 3	Sector 1	0°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	10°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	17°	30	6	17	3	-111,435

eNodo B 4	Sector 1	0°	15°	30	5	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	15°	30	5	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	15°	30	5	17	3	-111,435
eNodo B 5	Sector 1	0°	18°	30	5	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	18°	30	5	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	18°	30	5	17	3	-111,435
eNodo B 6	Sector 1	0°	10°	30	5	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	10°	30	5	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	18°	30	5	17	3	-111,435
eNodo B 7	Sector 1	0°	18°	30	5	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	18°	30	5	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	18°	30	5	17	3	-111,435
eNodo B 8	Sector 1	0°	20°	30	5	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	15°	30	5	17	3	-111,435

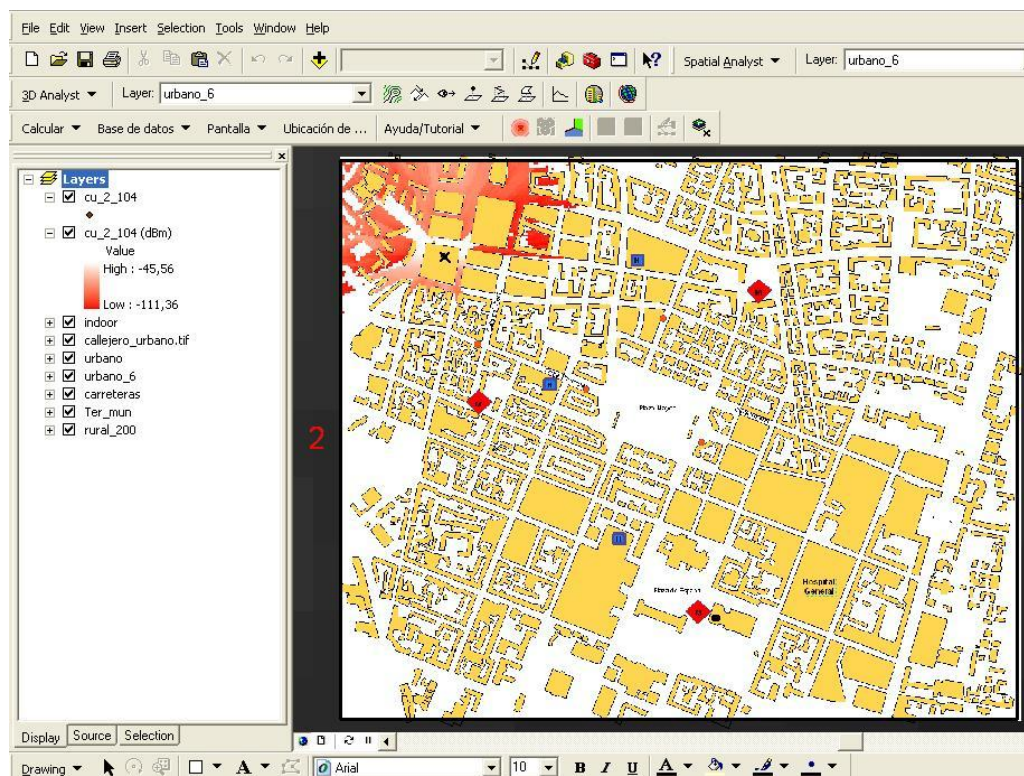
	<b>Sector 3</b>	240°	15°	30	5	17	3	-111,435
<b>eNodo B 9</b>	<b>Sector 1</b>	340°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	100°	17°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	220°	17°	30	5	17	3	-111,435
<b>eNodo B 10</b>	<b>Sector 1</b>	40°	0°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	160°	15°	30	5	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	280°	10°	30	5	17	3	-111,435

**Tabla 9.4. Configuración para cada sector del caso 1 en RadioGIS, usando el modelo Har-Xia-Bertoni**

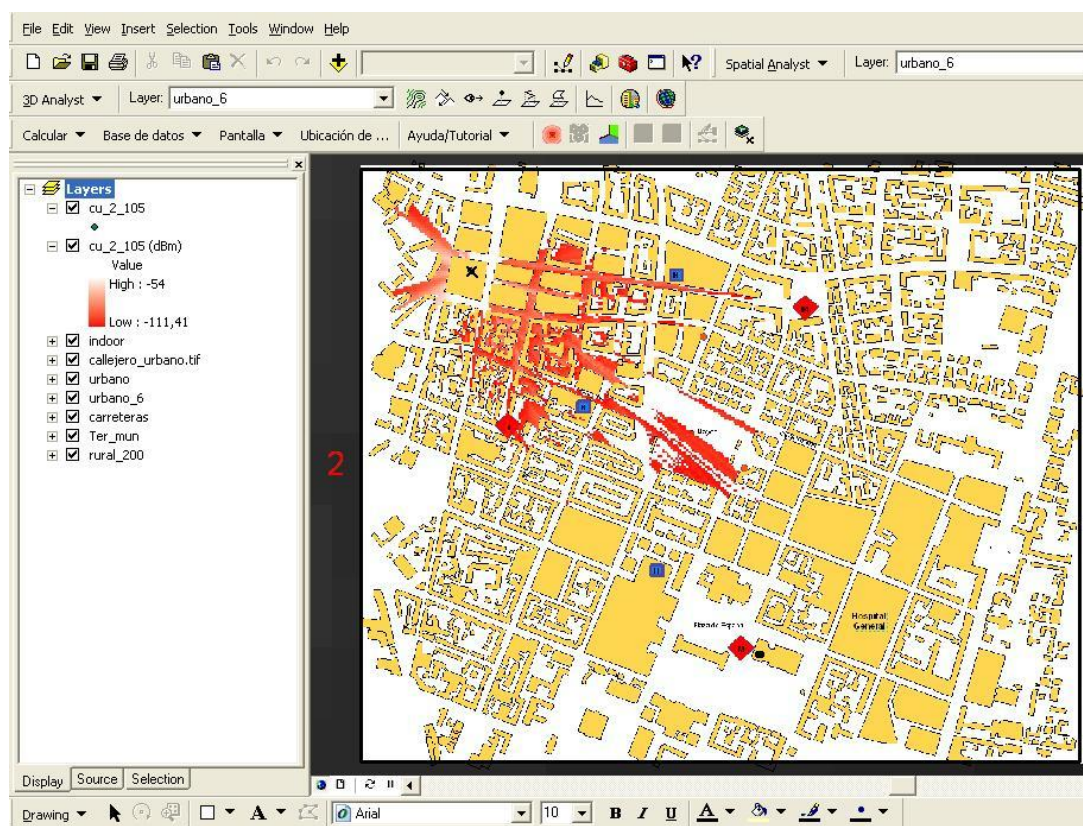
Los valores subrayados en tono amarillo indican variaciones respecto al caso anterior con COST-231, las cuales mayoritariamente se han producido en el ángulo de elevación,  $\varphi$ .

De la Figura 9.43 a la 9.84 observamos las citadas coberturas.

### Emplazamiento 1

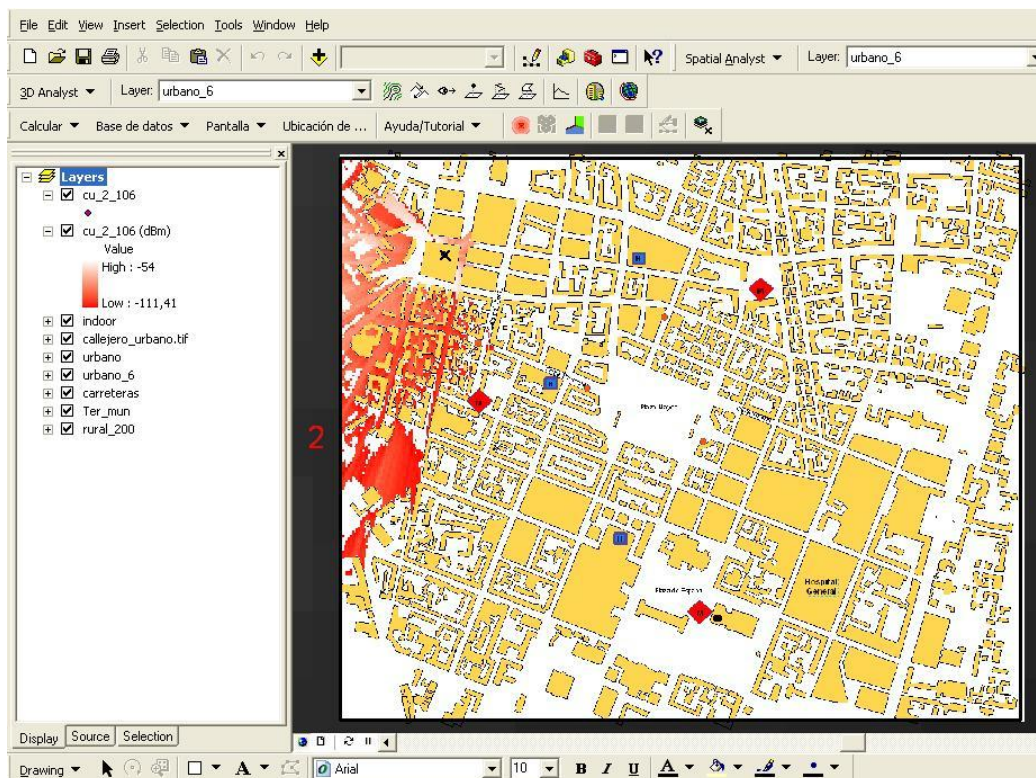


**Figura 9.43. Cobertura de primer sector ( $0^\circ$ ) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

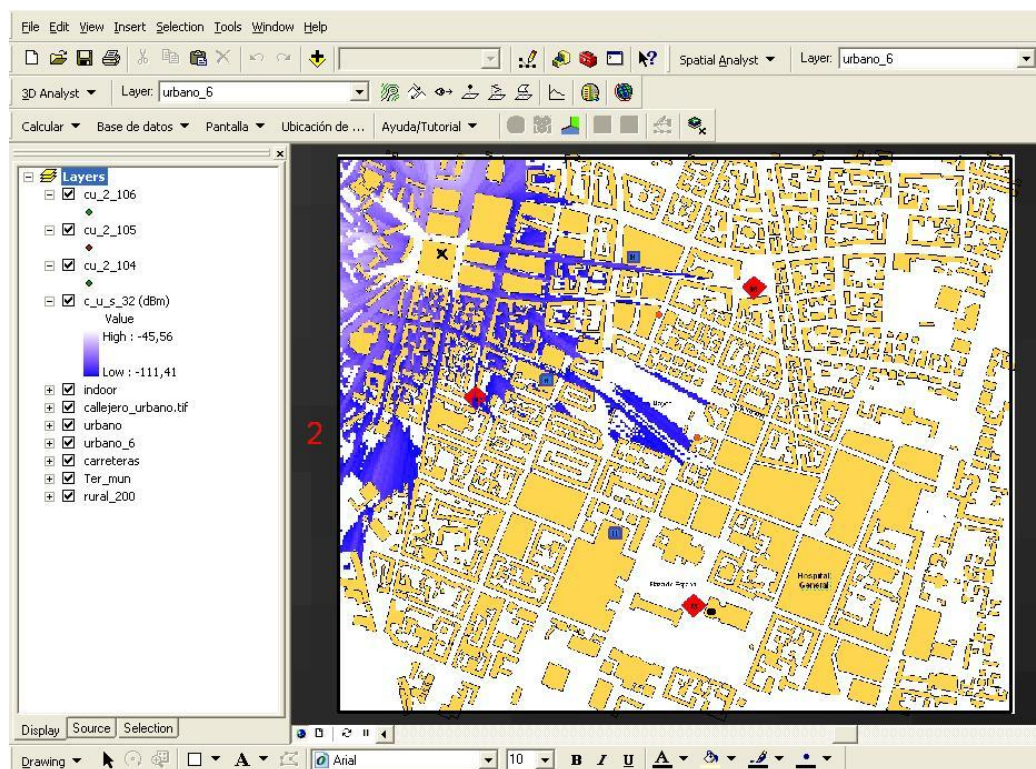


**Figura 9.44. Cobertura de segundo sector ( $120^\circ$ ) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**





**Figura 9.45. Cobertura de tercer sector (240°) de primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



**Figura 9.46. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



Emplazamiento 2

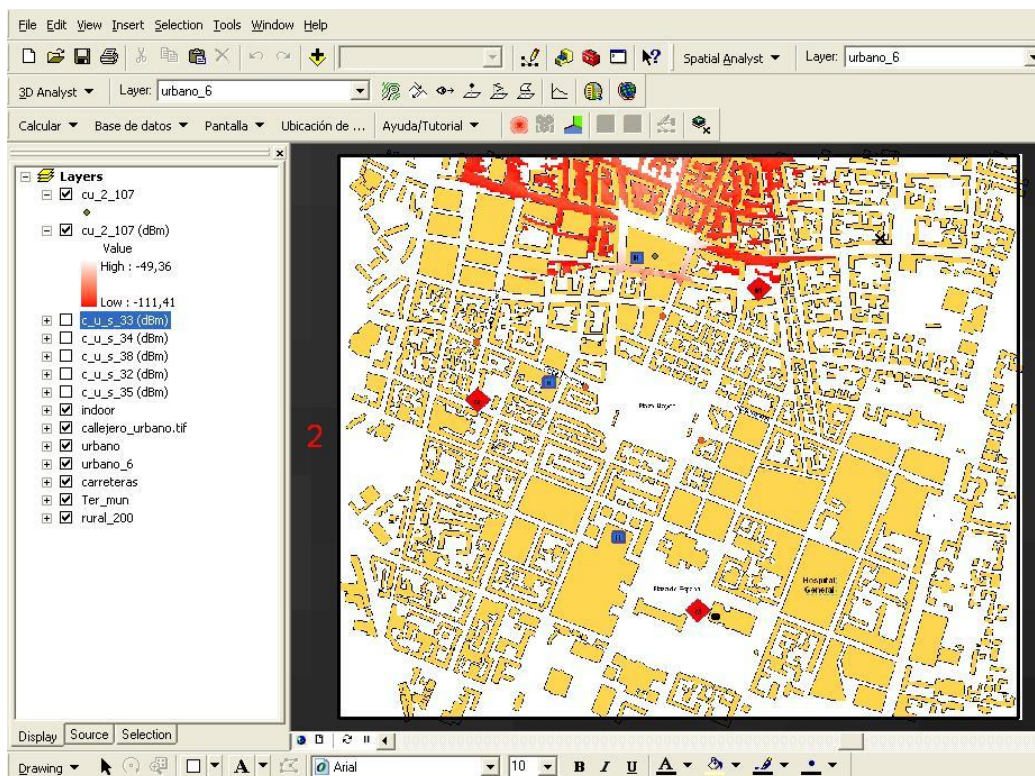
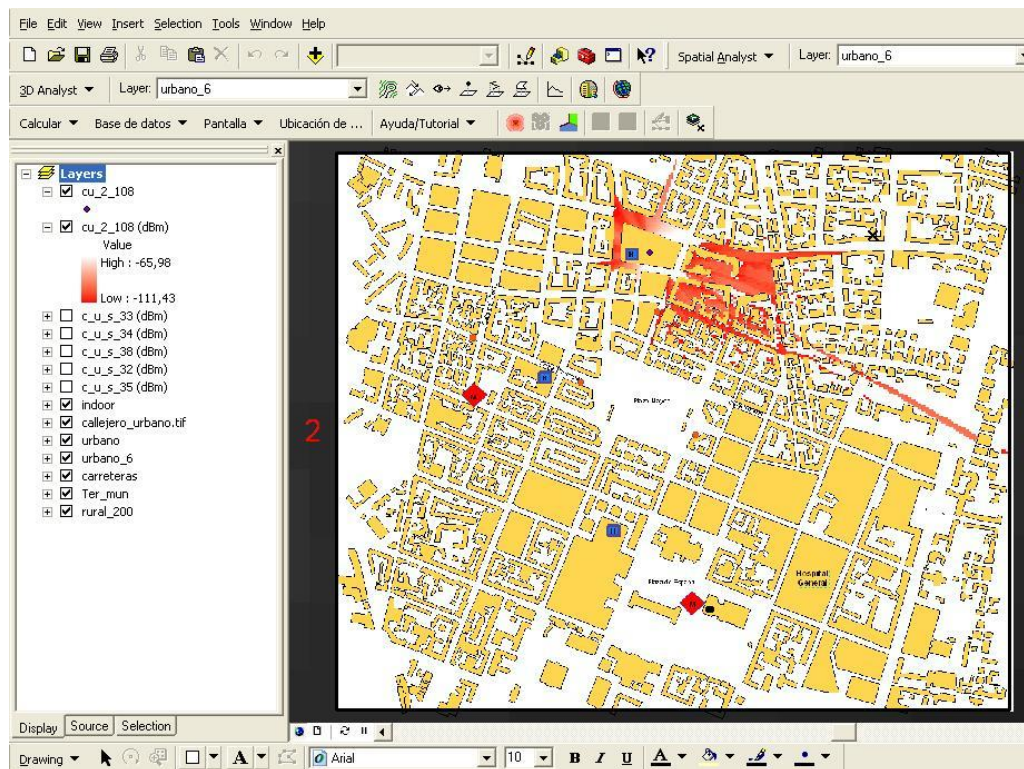
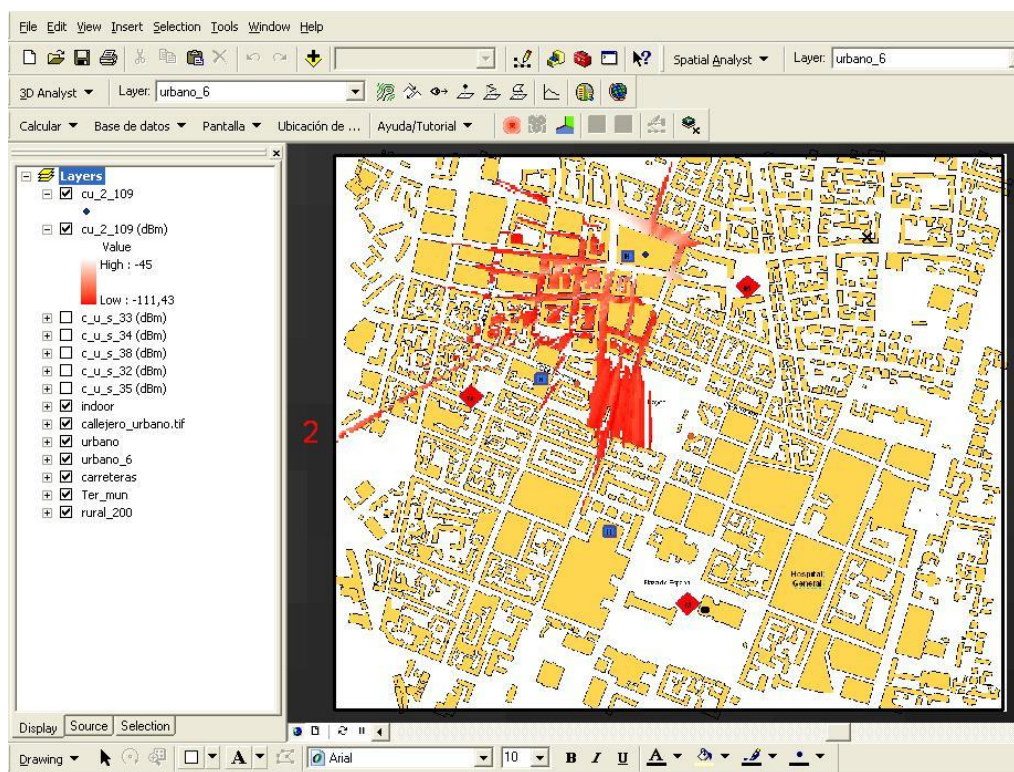


Figura 9.47. Cobertura de primer sector (0°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

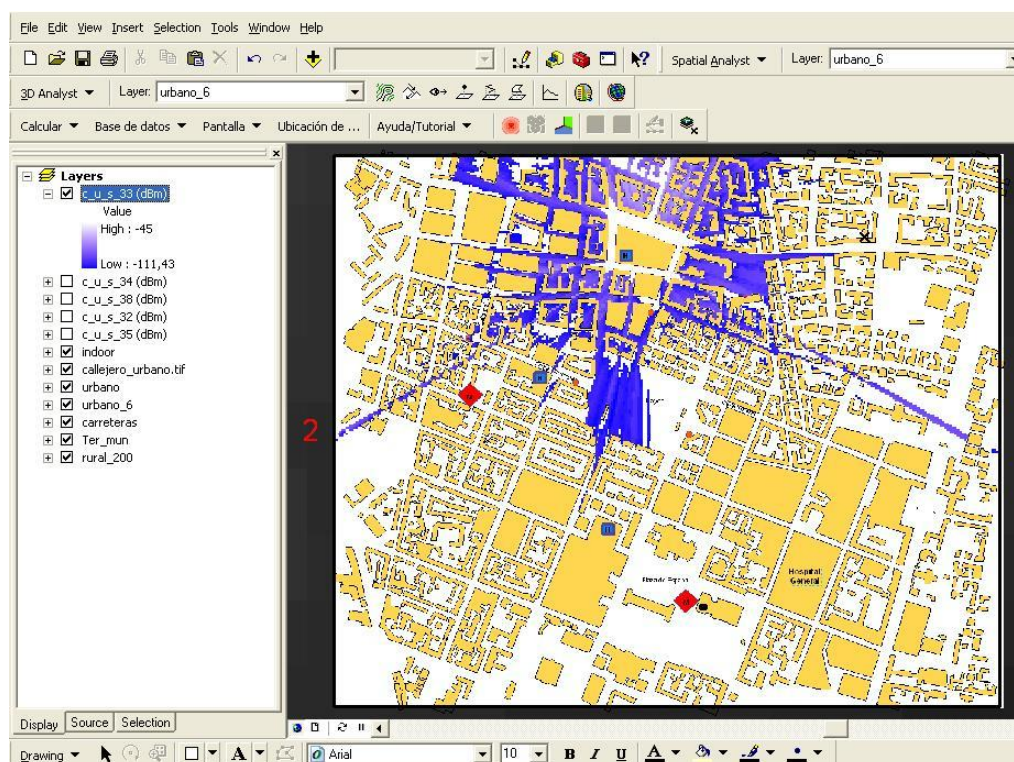




**Figura 9.48. Cobertura de segundo sector (120°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

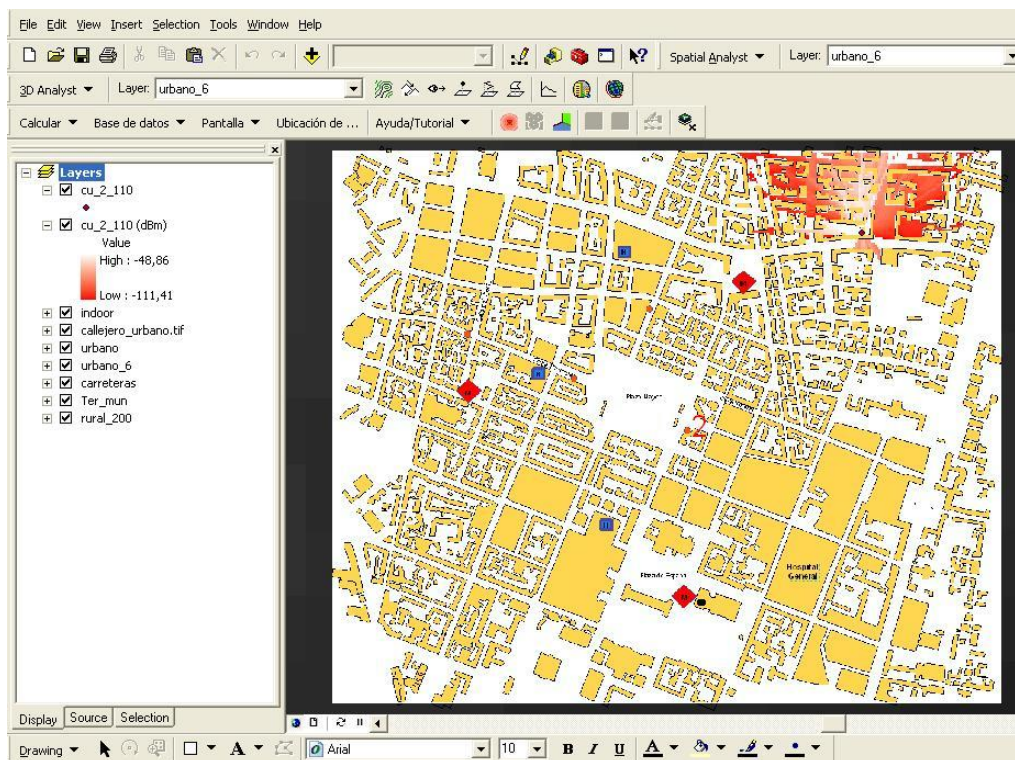


**Figura 9.49. Cobertura de tercer sector (240°) de segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



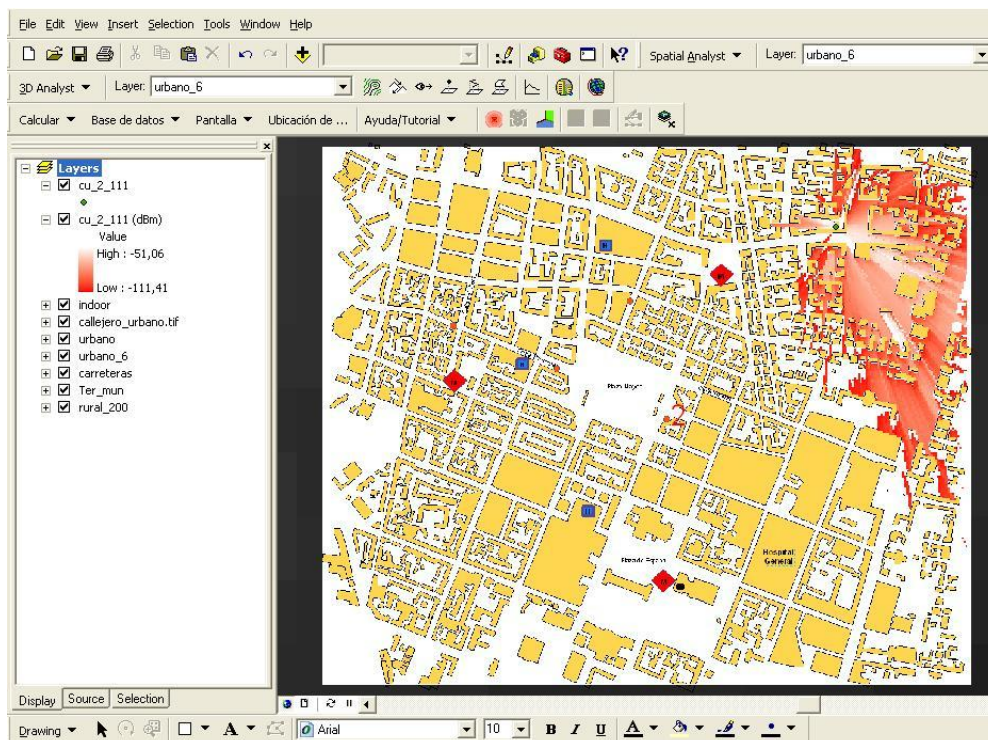
**Figura 9.50. Cobertura total proporcionada por segundo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

Emplazamiento 3

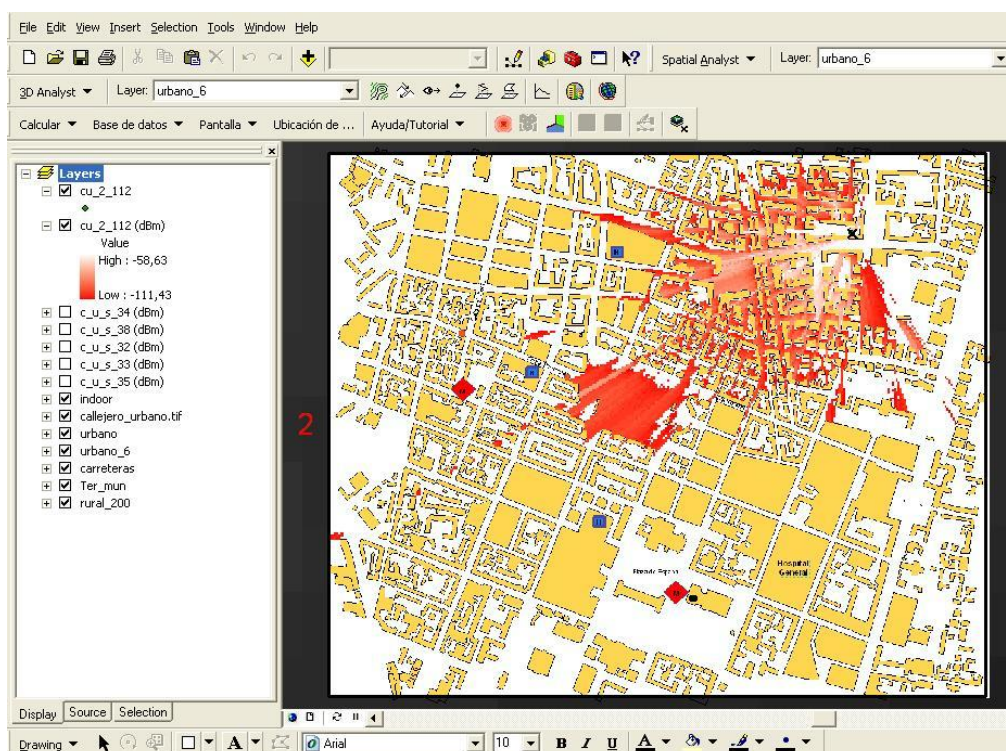


**Figura 9.51. Cobertura de primer sector (0°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



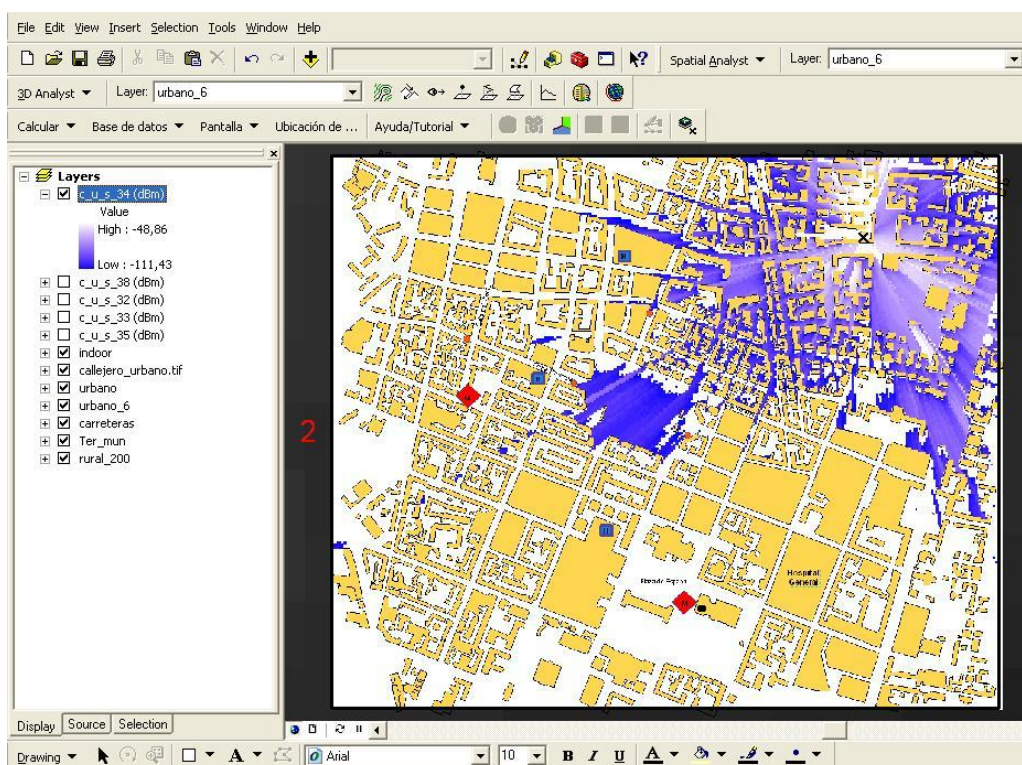


**Figura 9.52. Cobertura de segundo sector (120°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



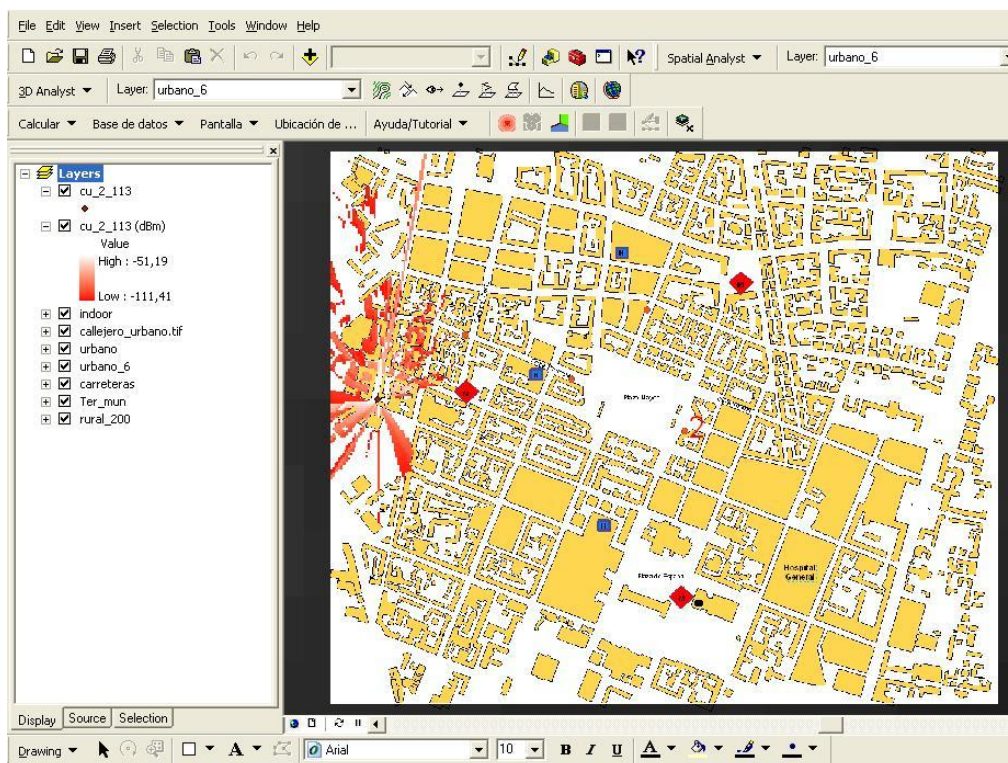
**Figura 9.53. Cobertura de tercer sector (240°) de tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**





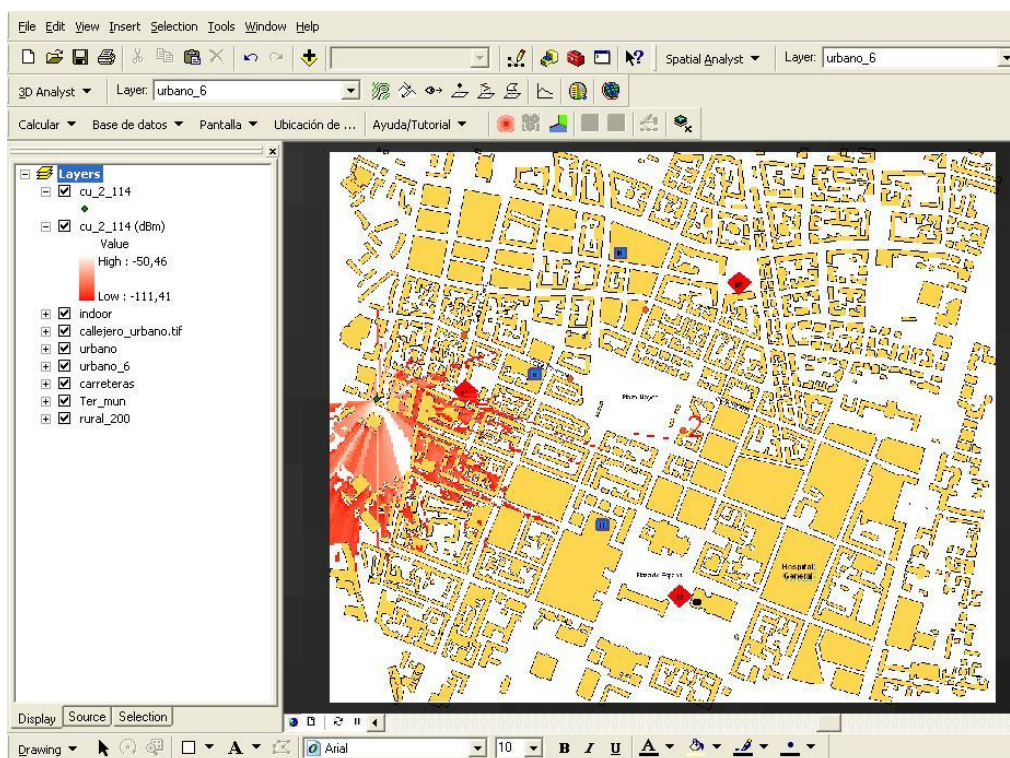
**Figura 9.54. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

Emplazamiento 4

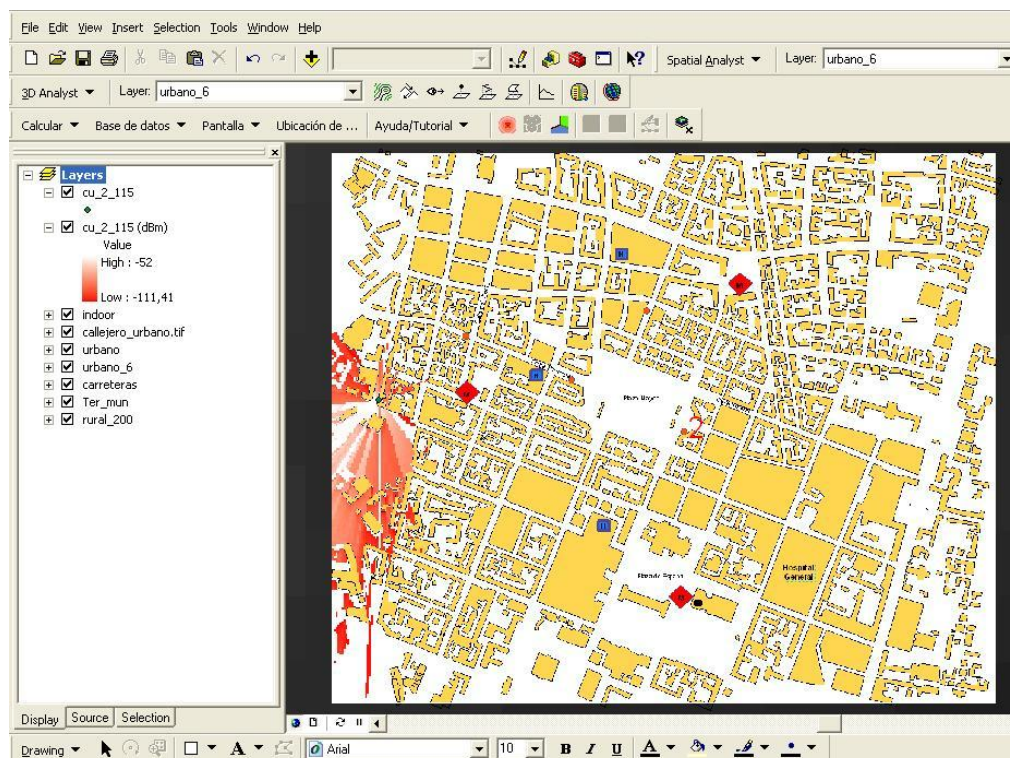




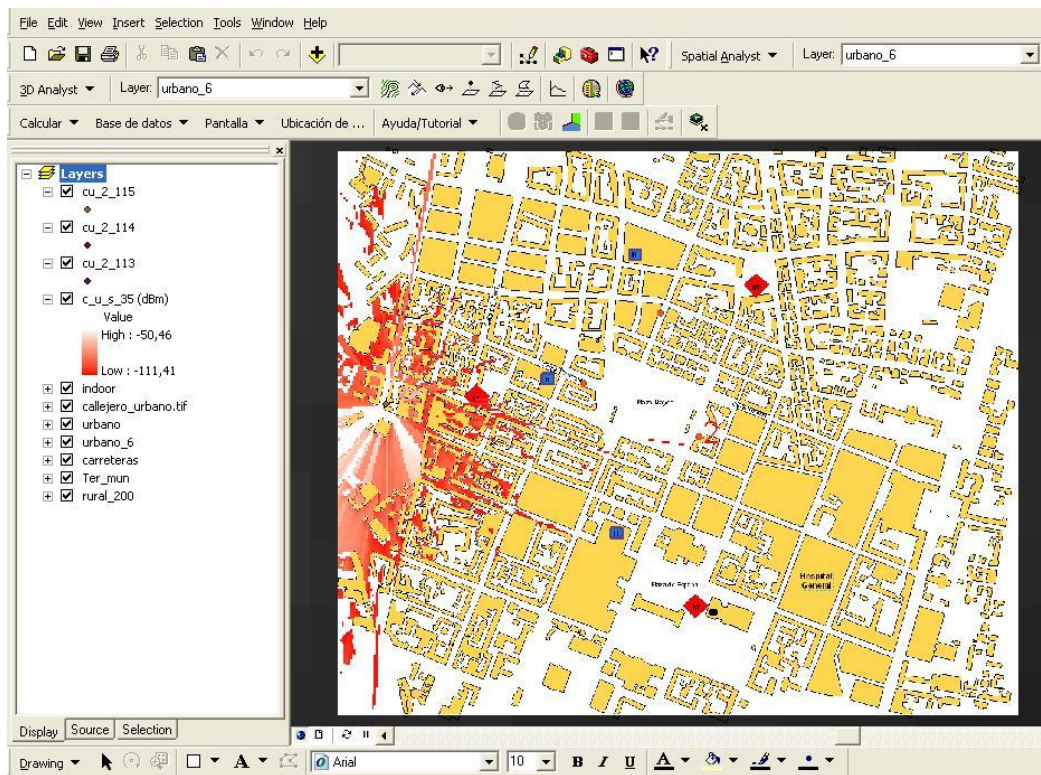
**Figura 9.55. Cobertura de primer sector (0°) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



**Figura 9.56. Cobertura de segundo sector (120°) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



**Figura 9.57. Cobertura de tercer sector (240°) de cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

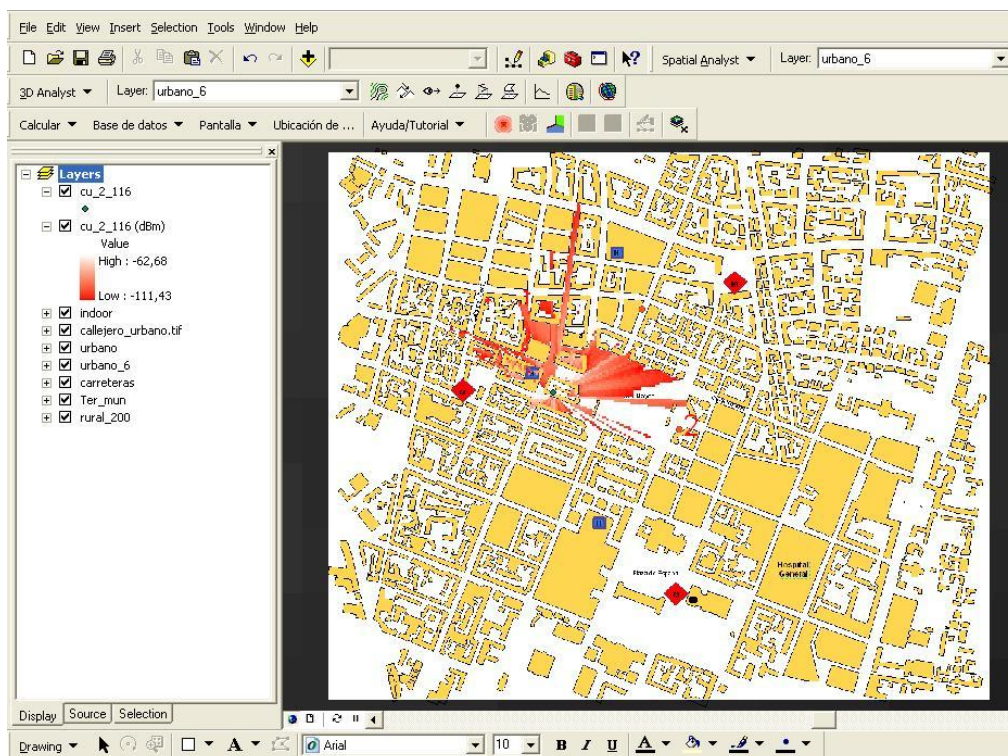


**Figura 9.58. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

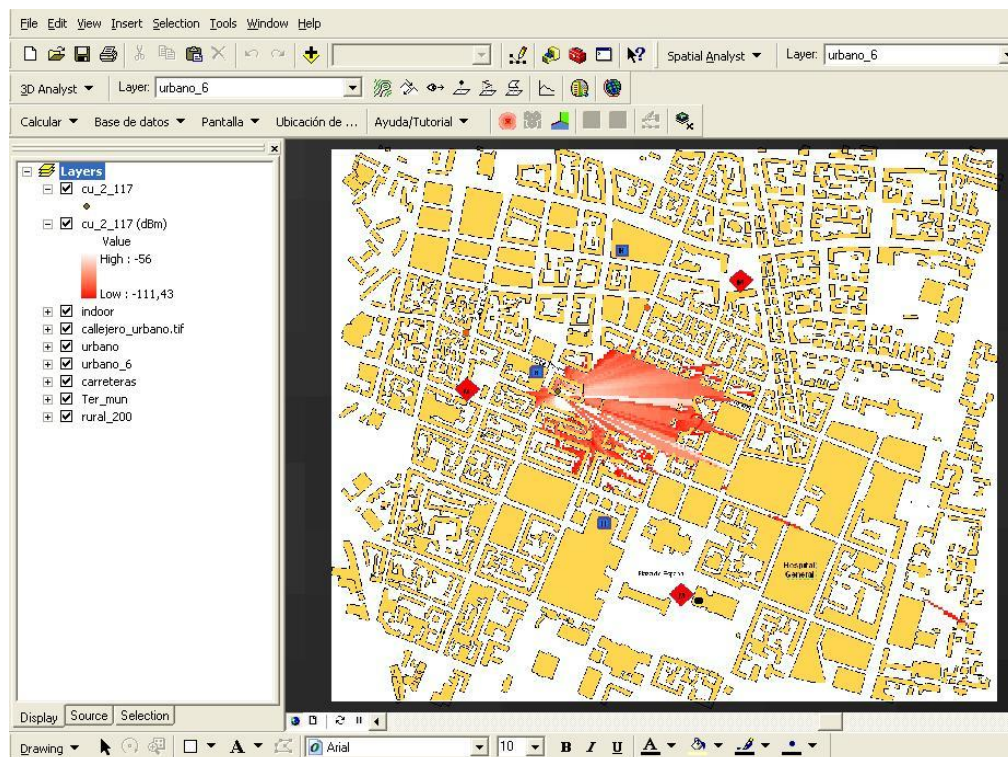
Como hemos fijado las mismas características que para el estudio con COST-231, podemos analizar la diferencia con la Figura 9.16. Como decíamos al inicio de este apartado, con Har-Xia-Bertoni los resultados son más desfavorables. Sin embargo, el área cubierta por los demás emplazamientos compensa la que no alcanza este eNodo B, por eso no variamos los datos.



Emplazamiento 5

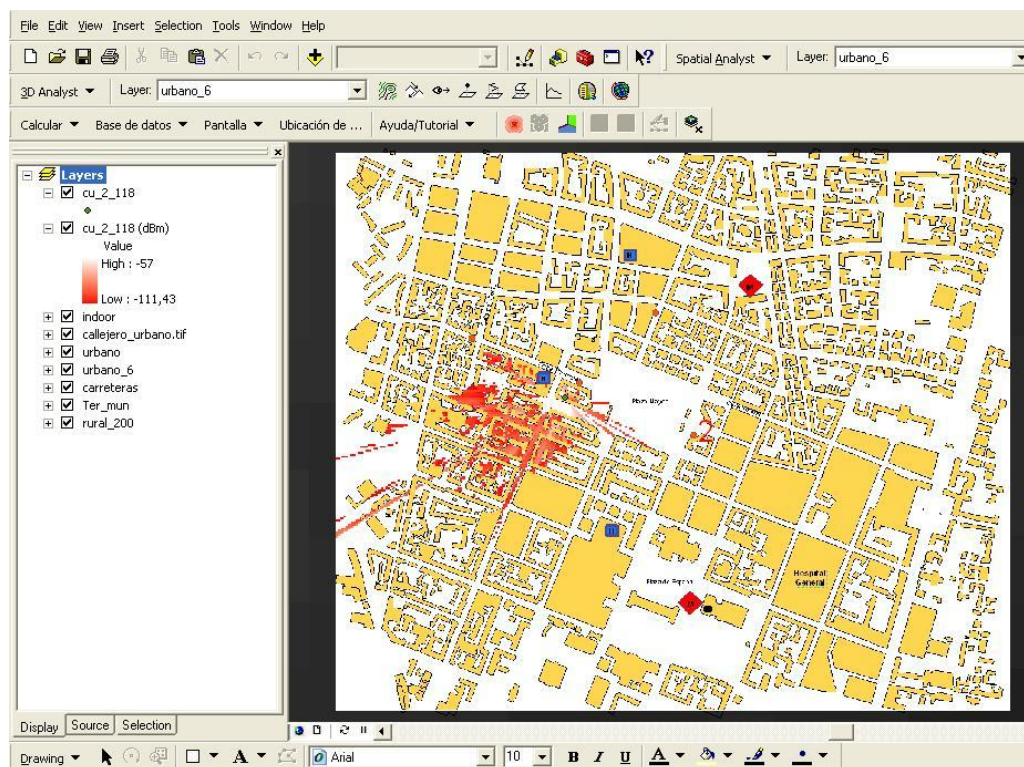


**Figura 9.59. Cobertura de primer sector (0°) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

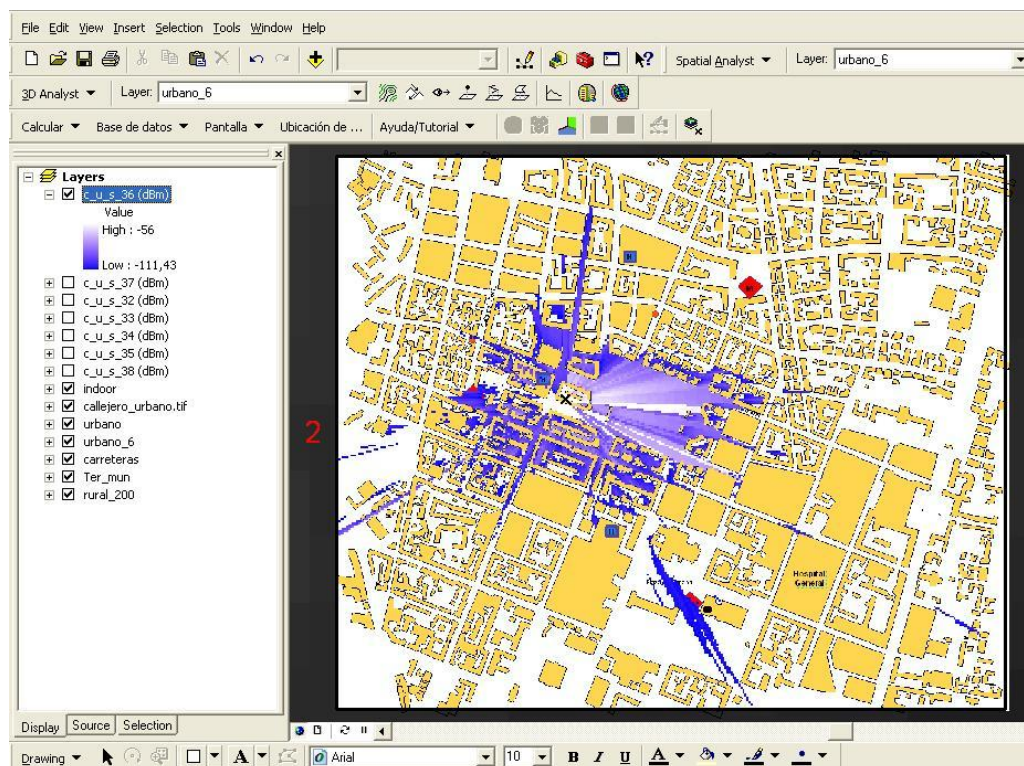




**Figura 9.60. Cobertura de segundo sector (120°) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

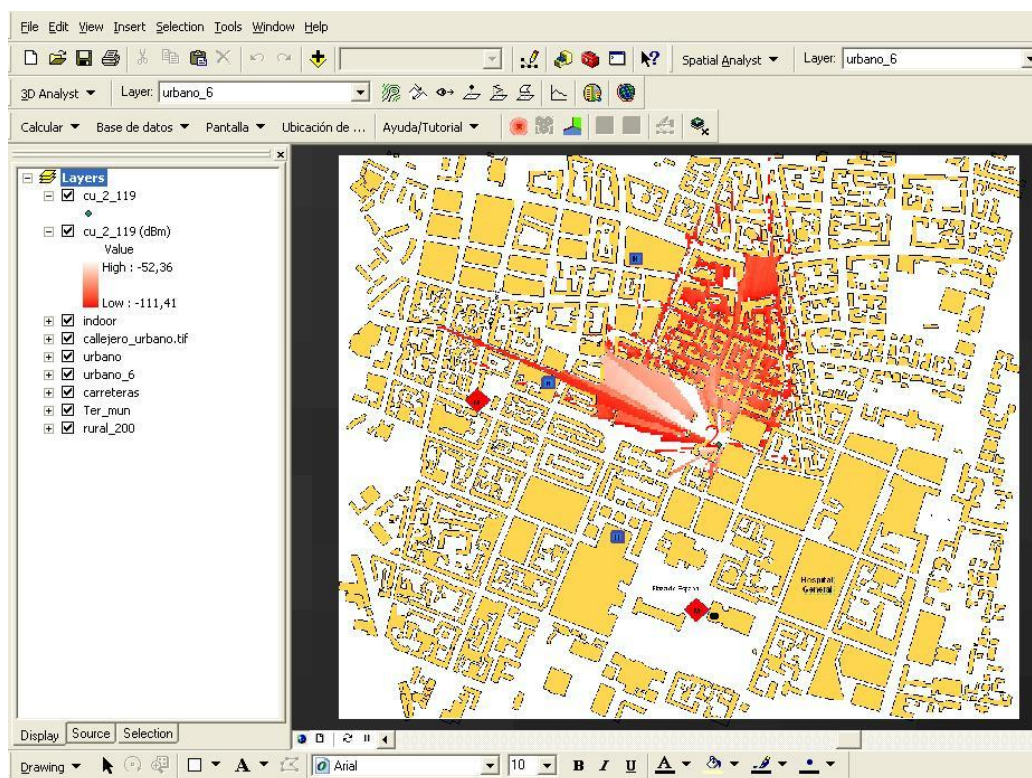


**Figura 9.61. Cobertura de tercer sector (240°) de quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



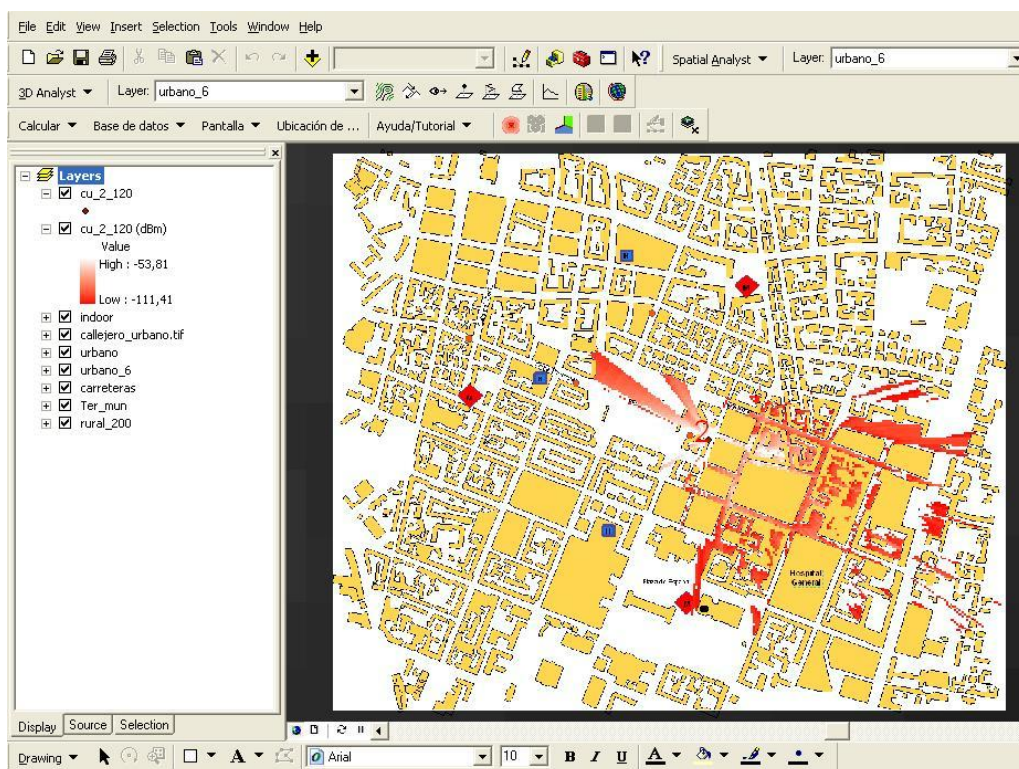
**Figura 9.62. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

Emplazamiento 6

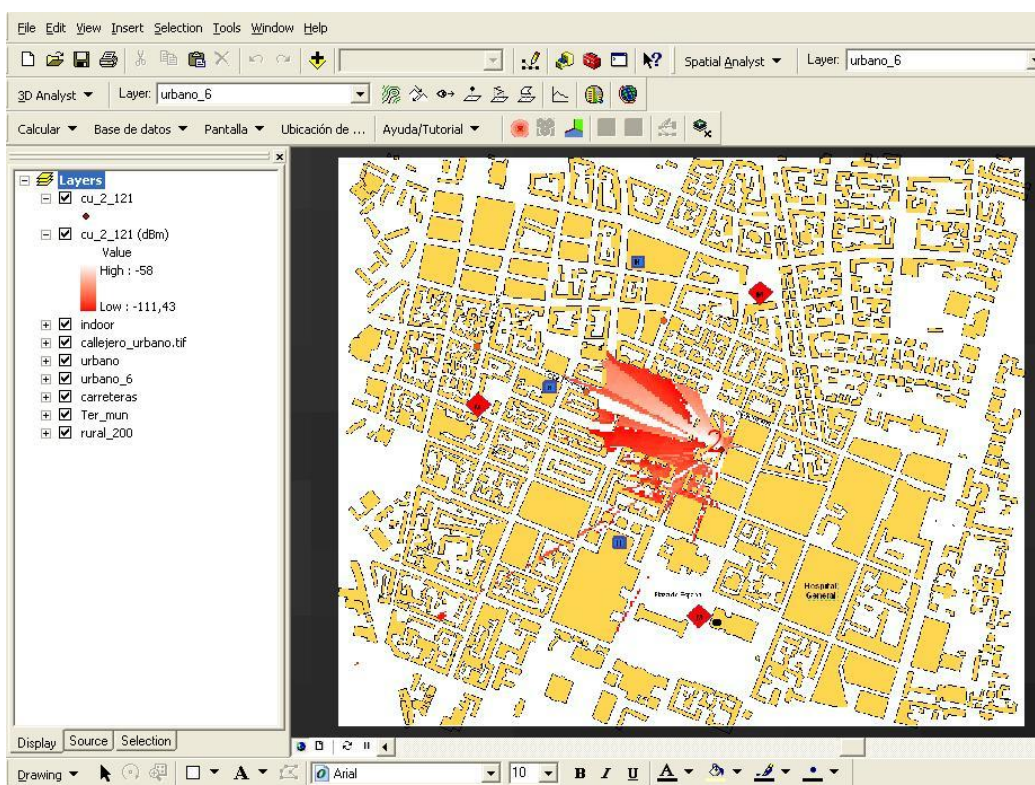


**Figura 9.63. Cobertura de primer sector (0°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



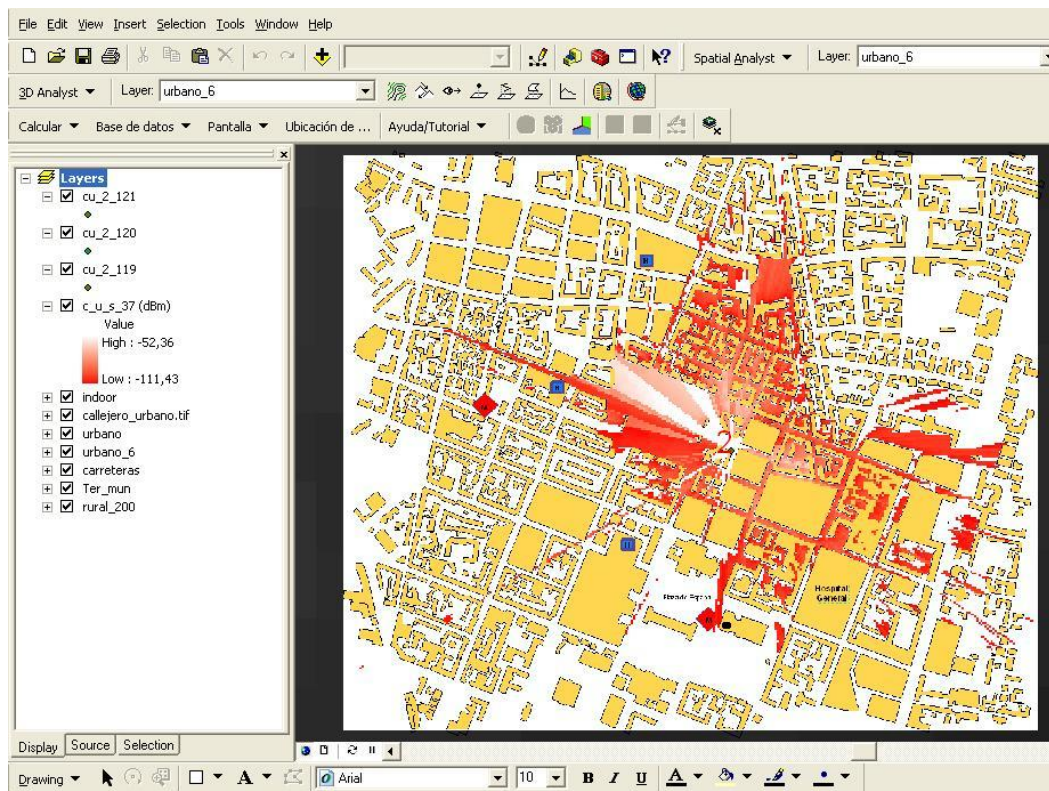


**Figura 9.64. Cobertura de segundo sector (120°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



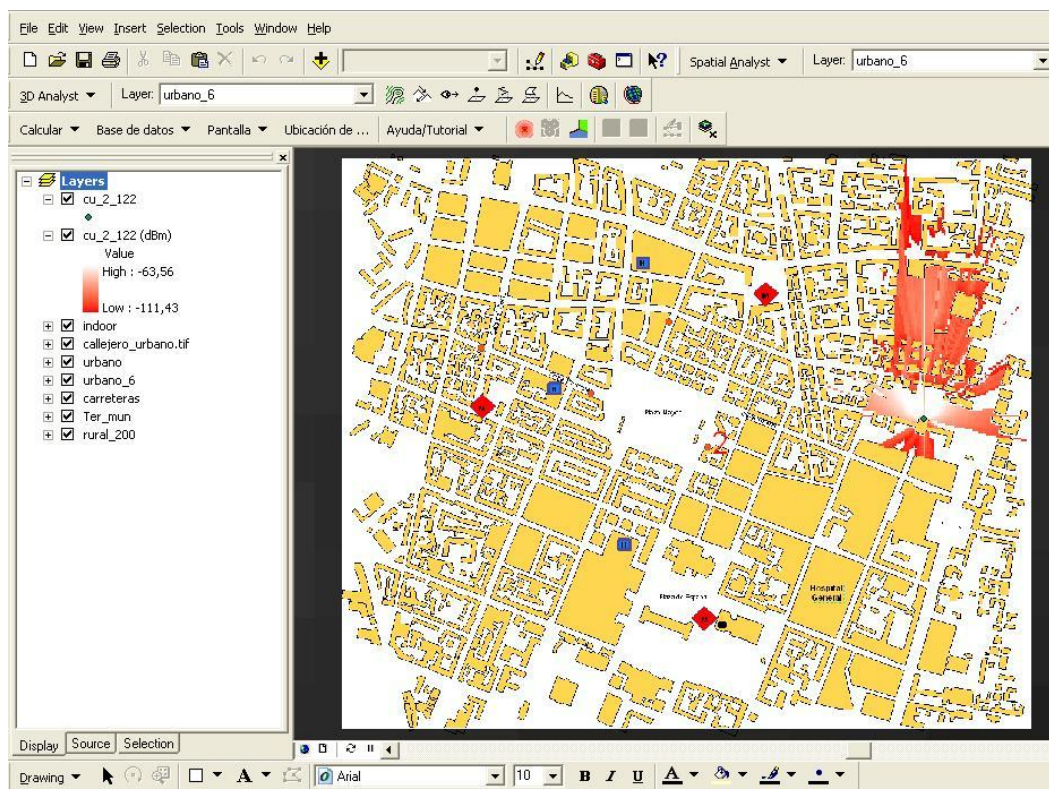
**Figura 9.65. Cobertura de tercer sector (240°) de sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**





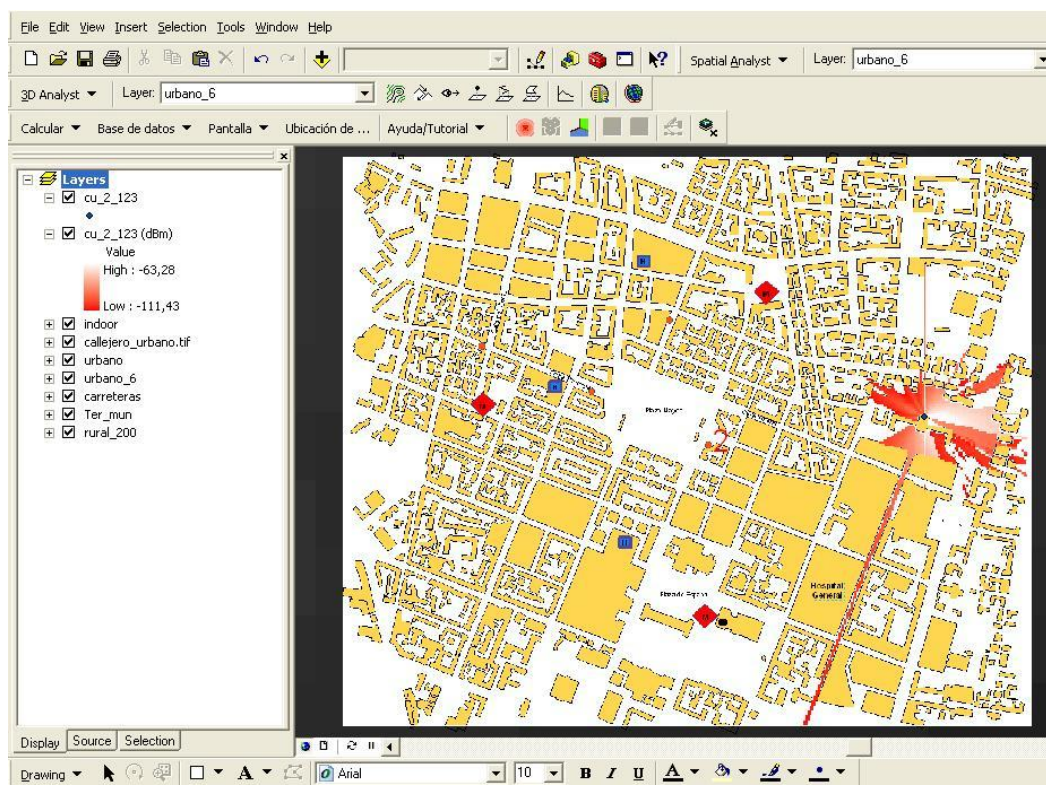
**Figura 9.66. Cobertura total proporcionada por sexto emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

### Emplazamiento 7

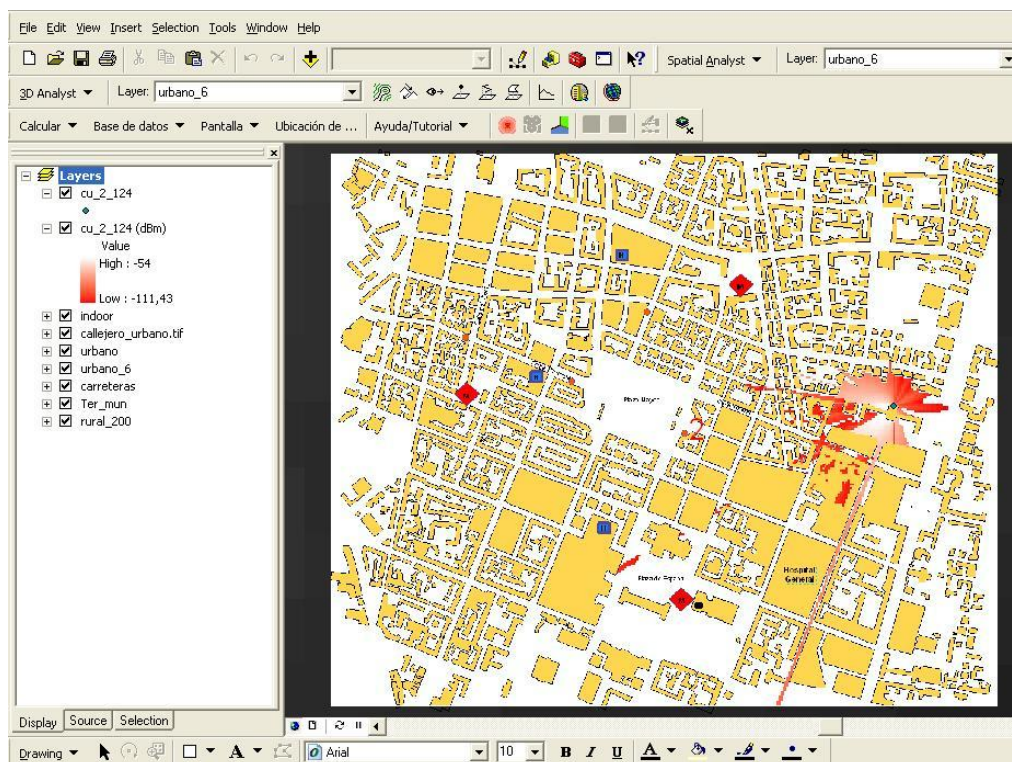




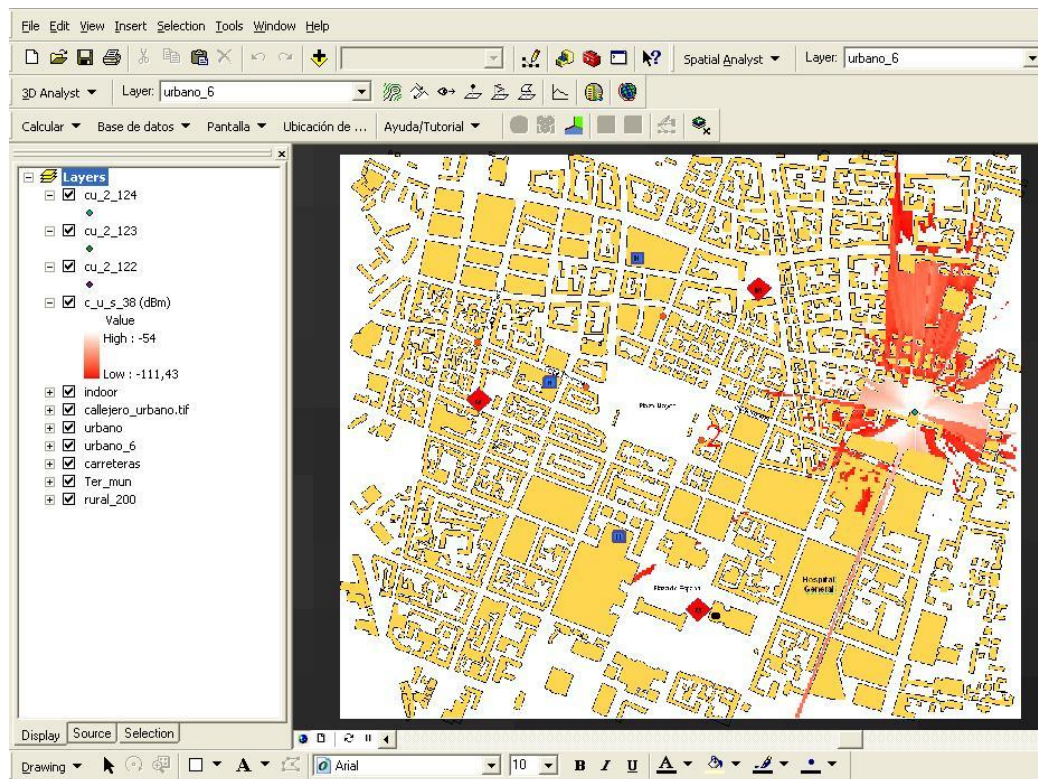
**Figura 9.67. Cobertura de primer sector (0°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



**Figura 9.68. Cobertura de segundo sector (120°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



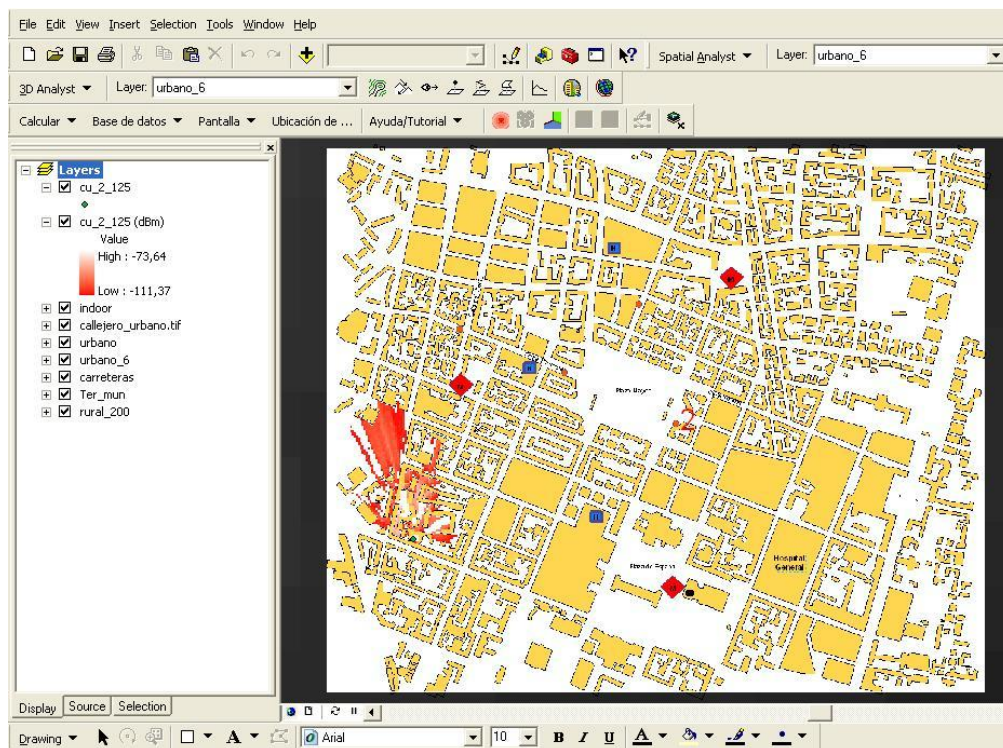
**Figura 9.69. Cobertura de tercer sector (240°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



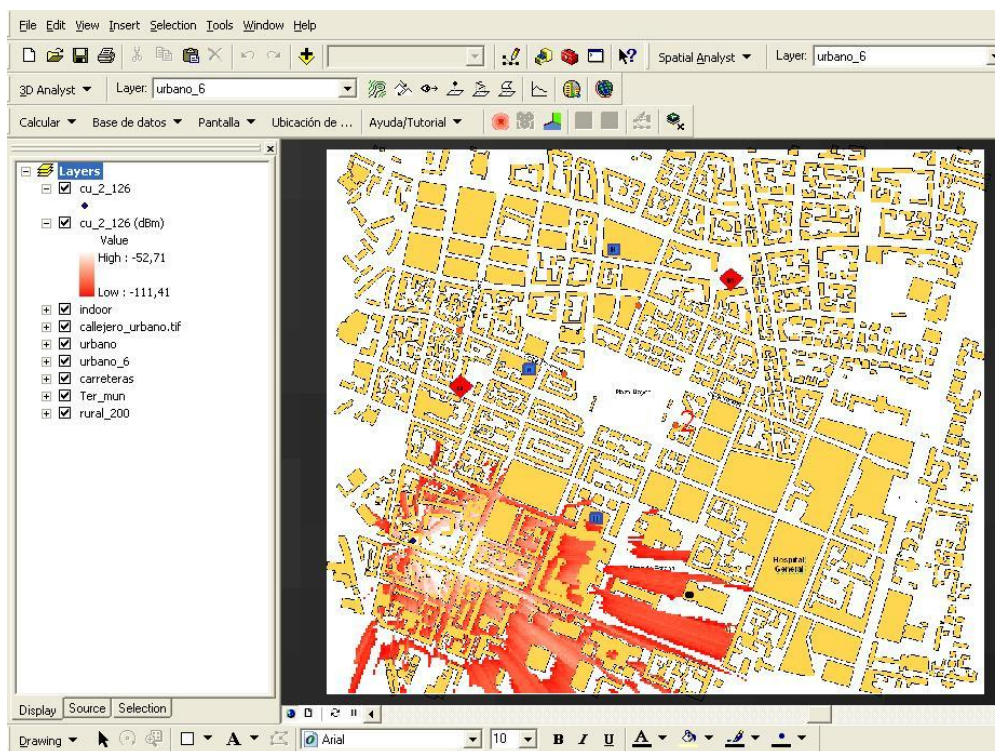
**Figura 9.70. Cobertura total proporcionada por séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



Emplazamiento 8

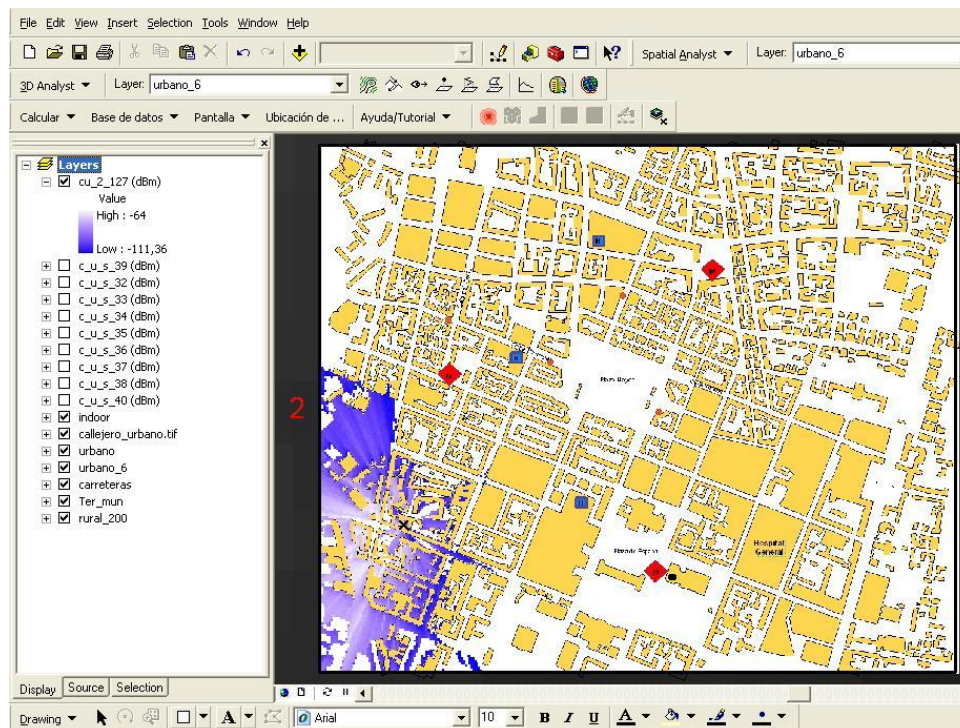


**Figura 9.71. Cobertura de primer sector (0°) de octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

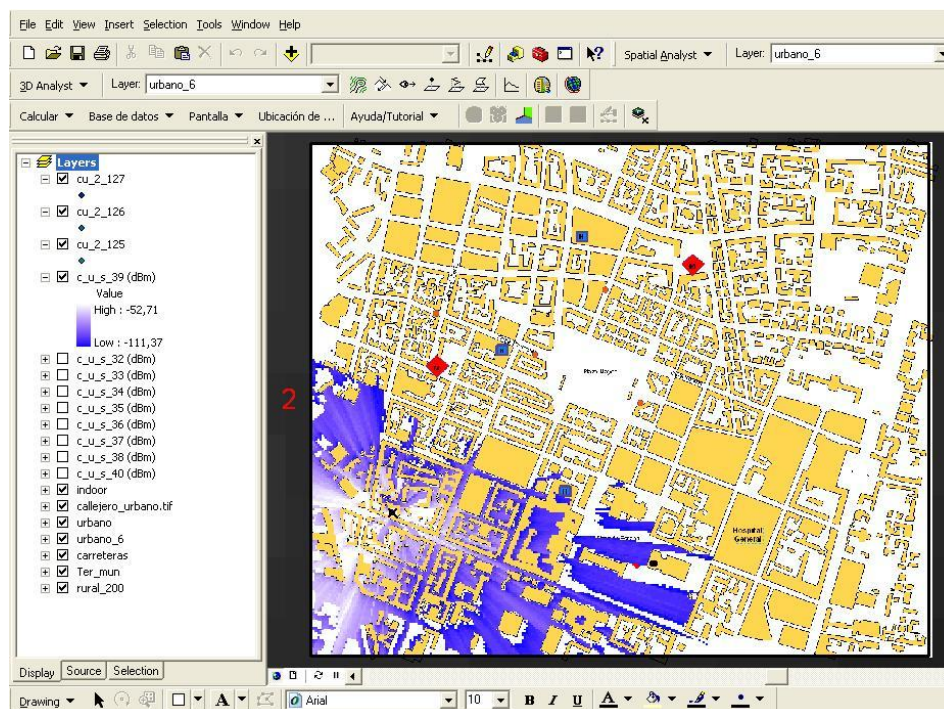


**Figura 9.72. Cobertura de segundo sector (120°) de séptimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**





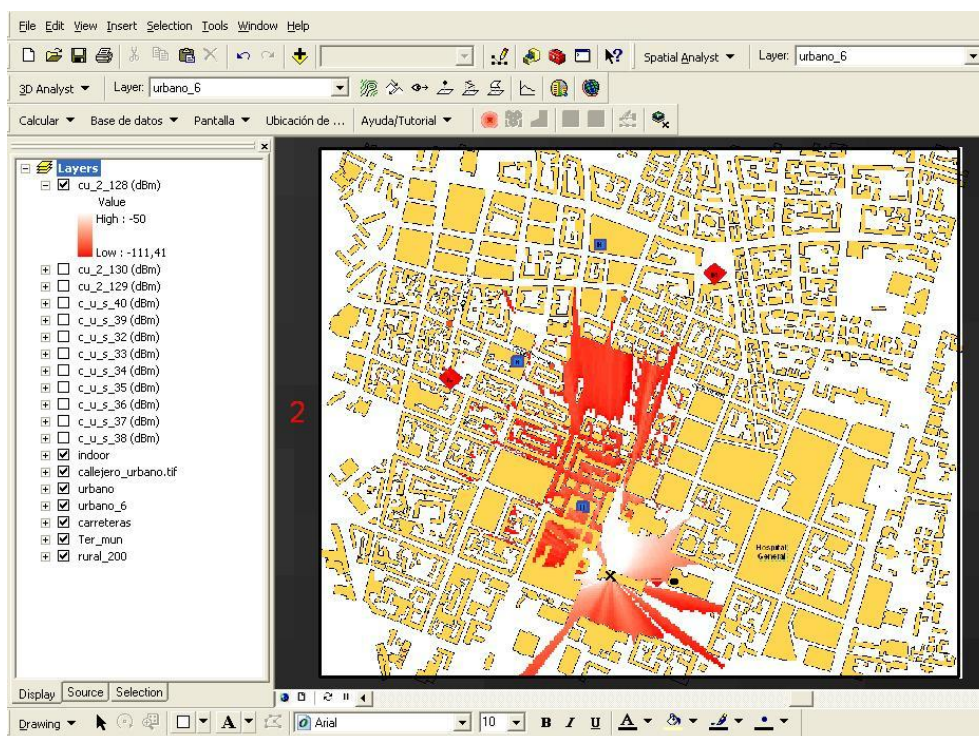
**Figura 9.73. Cobertura de tercer sector (240°) de octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



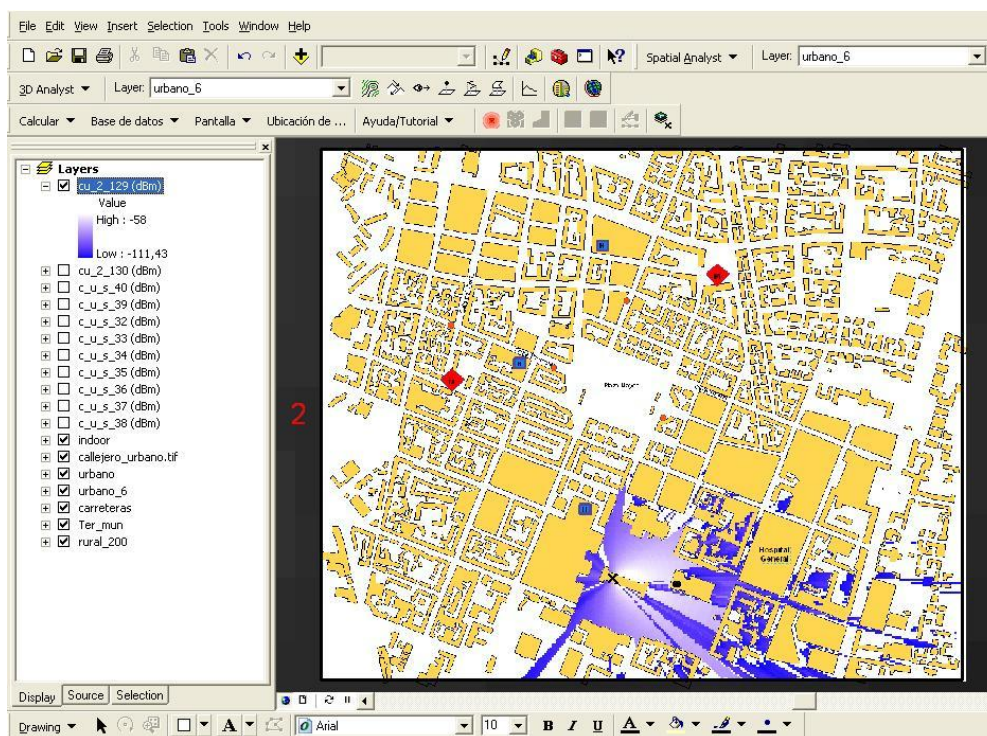
**Figura 9.74. Cobertura total proporcionada por octavo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



Emplazamiento 9

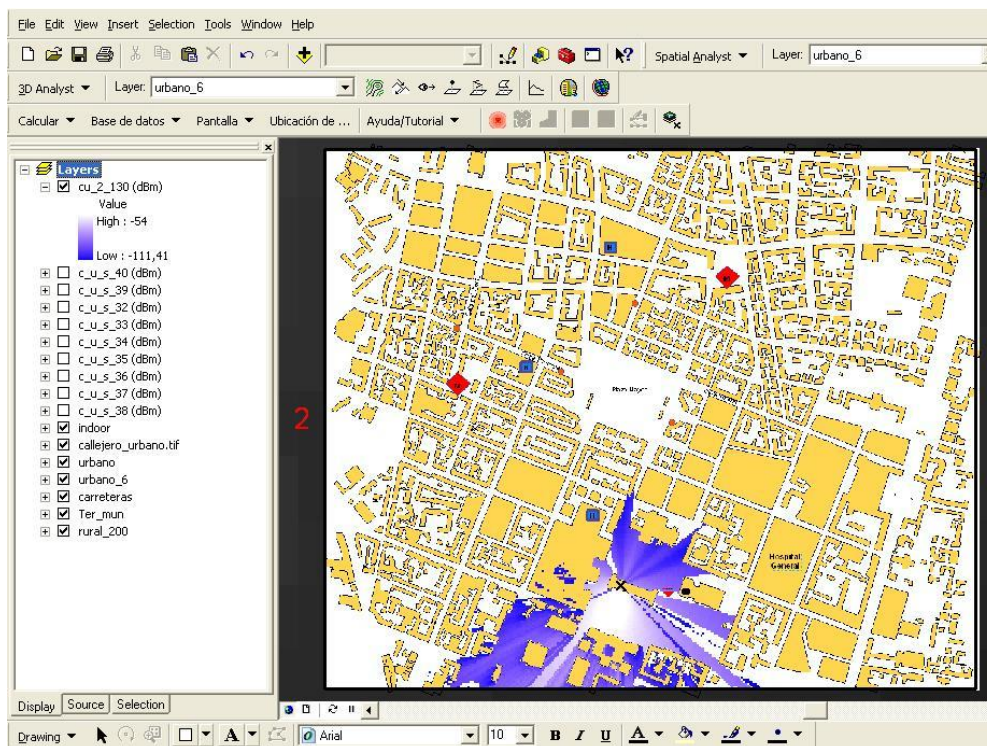


**Figura 9.75. Cobertura de primer sector (340°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

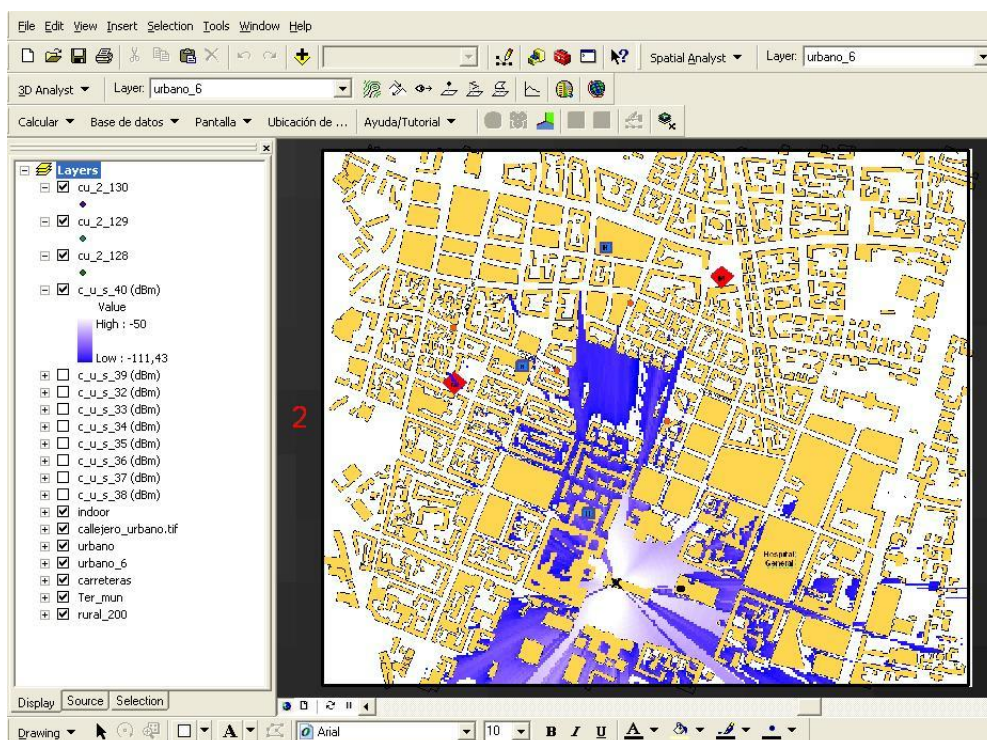


**Figura 9.76. Cobertura de segundo sector (100°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**





**Figura 9.77. Cobertura de tercer sector (220°) de noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



**Figura 9.78. Cobertura total proporcionada por noveno emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



Emplazamiento 10

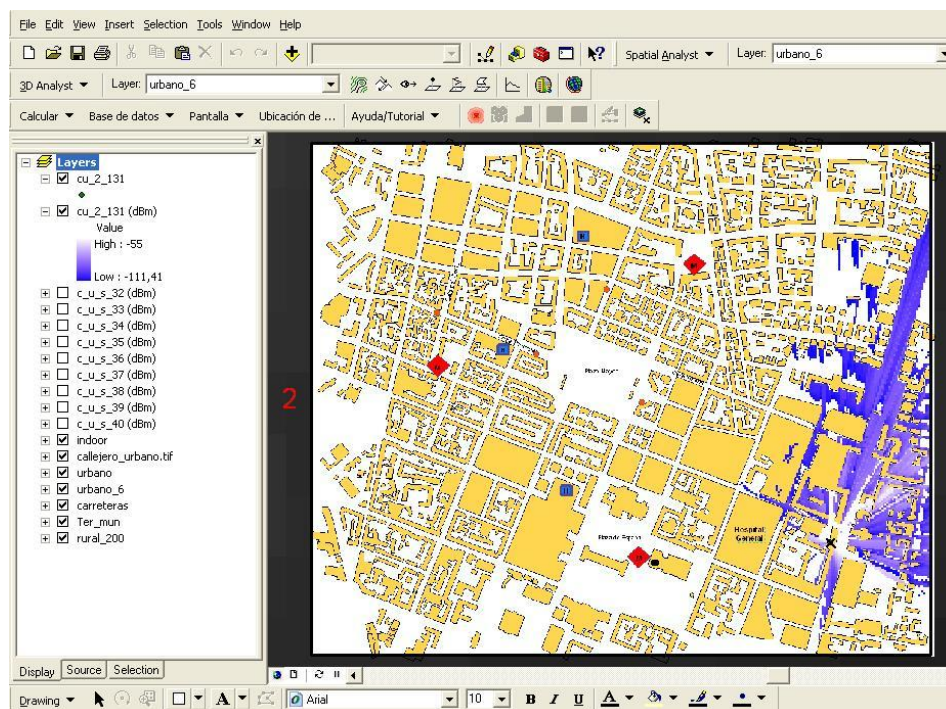


Figura 9.79. Cobertura de primer sector (40°) de décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

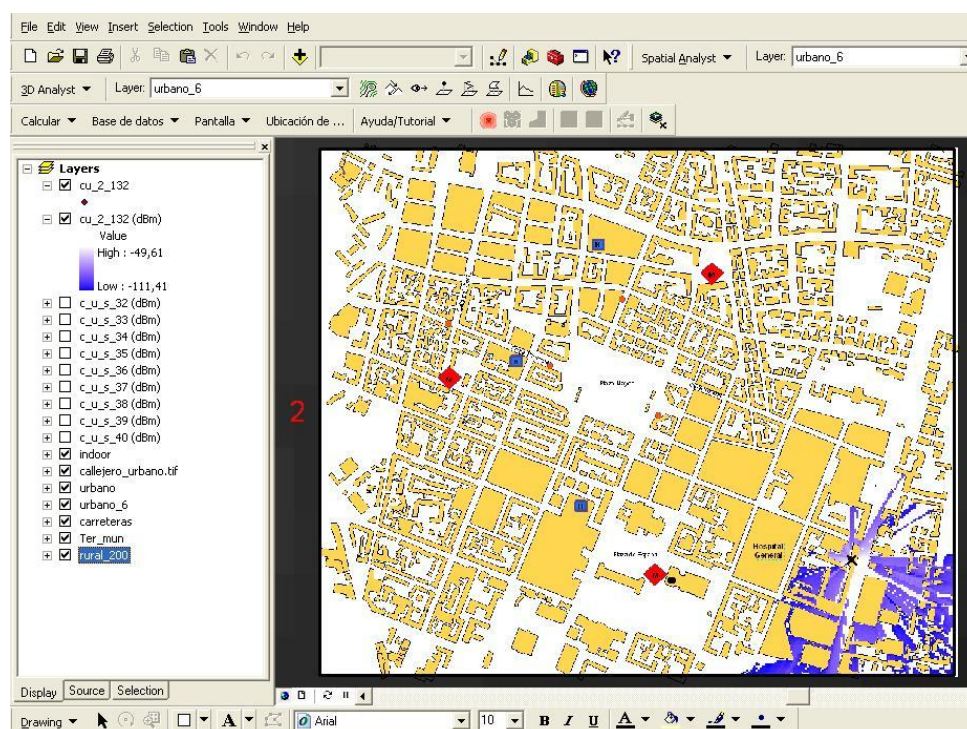
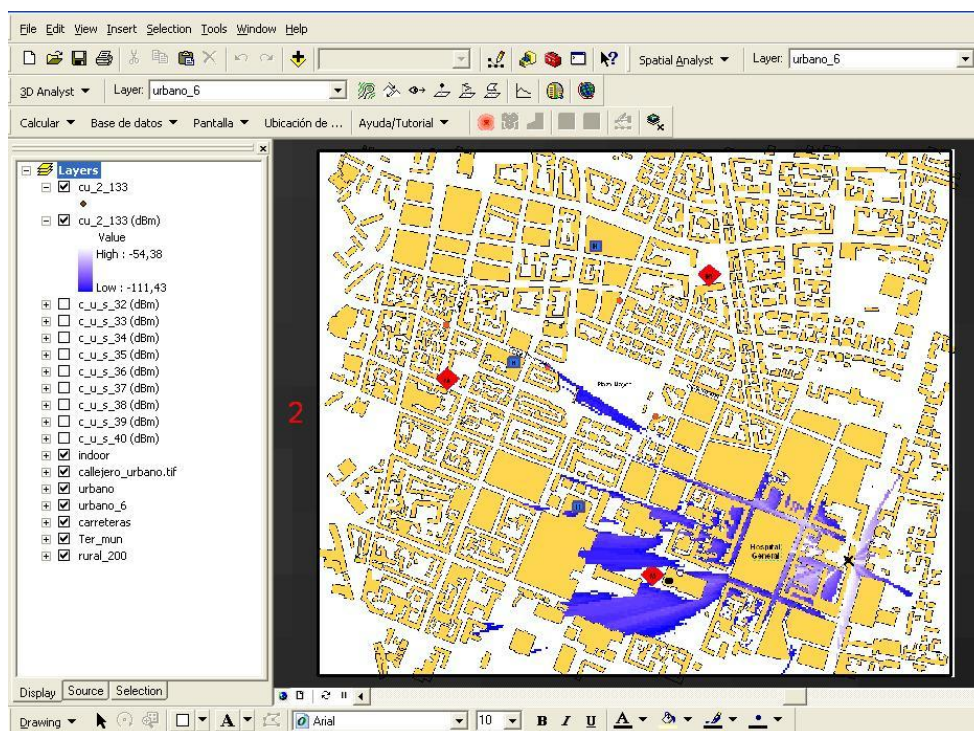
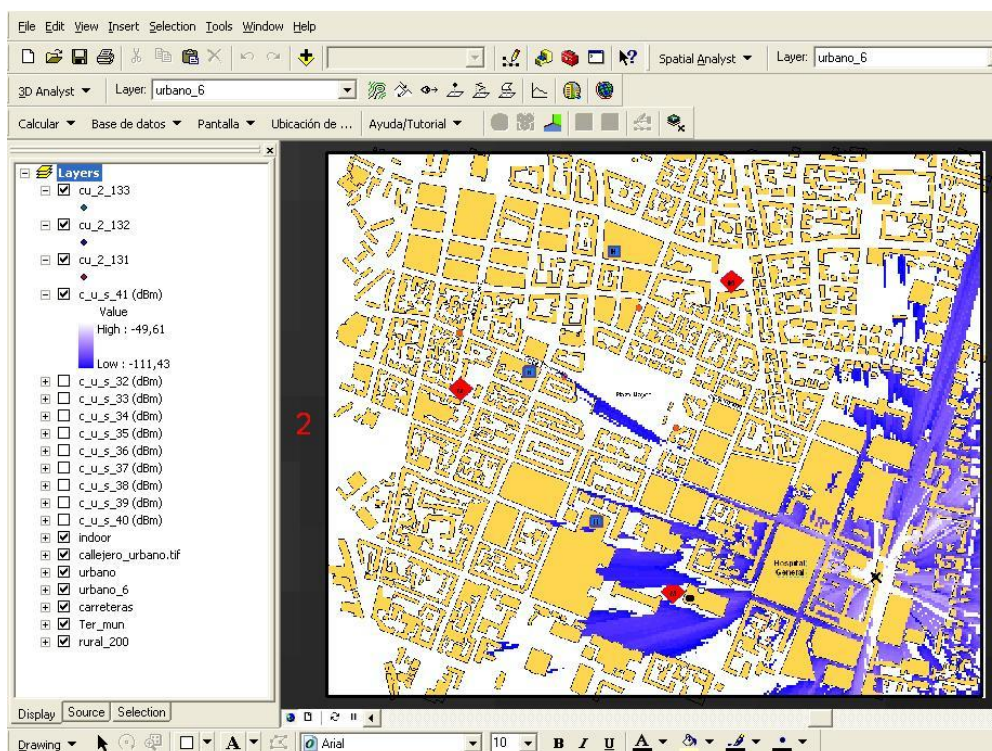


Figura 9.80. Cobertura de segundo sector (160°) de décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni



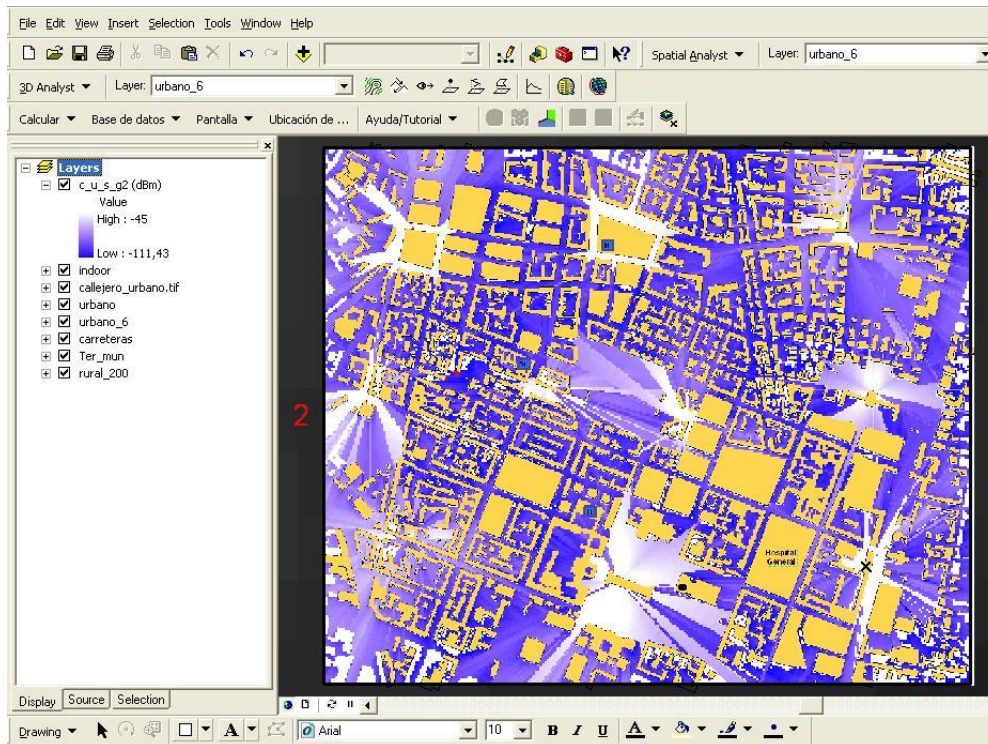


**Figura 9.81. Cobertura de tercer sector (280°) de décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



**Figura 9.82. Cobertura total proporcionada por décimo emplazamiento para caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

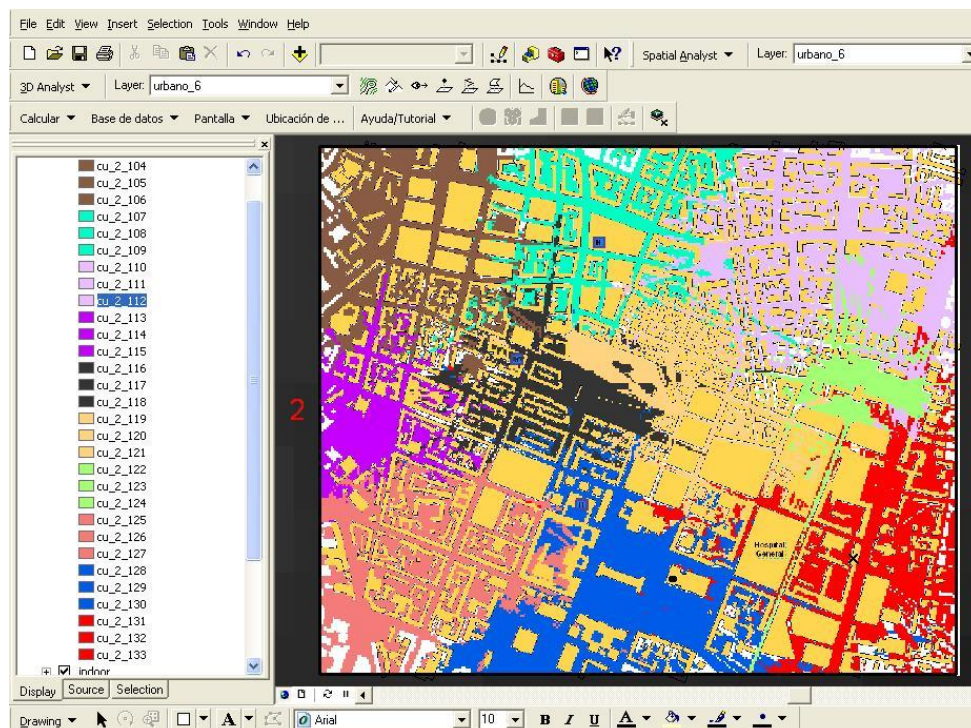
Ahora representamos la cobertura de todo el sistema en la Figura 9.83.



**Figura 9.83. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

Al igual que hicimos con el modelo de propagación COST-231, hemos configurado los 10 eNodos B de modo que demos servicio a toda nuestra zona urbana, tal y como se aprecia en la Figura 9.83. Seguidamente, mostramos en la Figura 9.84 el mapa de mejor servidor.





**Figura 9.84. Mapa de mejor servidor en el sistema correspondiente al caso 1 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

De nuevo obtenemos el mapa que indica en cada punto qué eNodo B es el que le proporciona un mayor nivel de potencia. El análisis de la planificación para la modulación QPSK finaliza con la Figura 9.84, dando paso al caso 2 correspondiente a la modulación 16-QAM.

### 9.1.2. CASO 2 – 16-QAM, MIMO 2 x 2, CQI = 8

La ubicación de los 6 eNodos B que se van a considerar en este caso viene dada en la Tabla 9.5.

COORDENADAS		
	X (m)	Y (m)
eNodo B 1	3690781	5338686
eNodo B 2	3691399	5338454
eNodo B 3	3692246	5338572
eNodo B 4	3690804	5337917
eNodo B 5	3691360	5337654
eNodo B 6	3692046	5337721

**Tabla 9.5. Coordenadas de la ubicación de los eNodos B para el caso 2**

### 9.1.2.1. UBICACIÓN BASADA EN USO DE MODELO DE PROPAGACIÓN COST-231

Ahora tenemos una modulación superior a la del caso 1, lo que significa que esta segunda opción presentará una calidad en el canal superior a la del caso anterior. Esto es así porque, como ya dijimos, las condiciones presentes en el canal nos limitarán la configuración tanto de modulación como de CQI, lo que se refleja en la tasa de bit.

En la Tabla 9.6 tenemos la siguiente tabla resumen para este caso con COST-231 y los 6 emplazamientos.

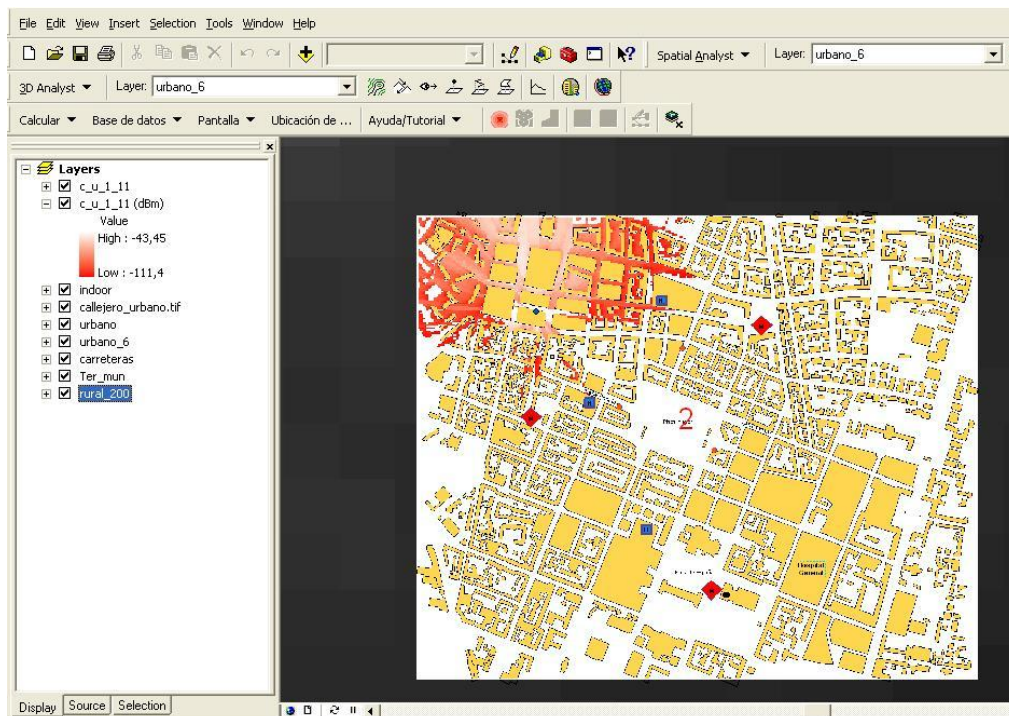
		Acimut ( $\theta$ )	Elev ( $\varphi$ )	H <sub>TX</sub> (m)	PIRE (dBm)	G <sub>r</sub> (dB)	L <sub>r</sub> (dB)	S (dBm)
eNodo B 1	Sector 1	0°	0°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	25°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	5°	30	10	17	3	-111,435
eNodo B 2	Sector 1	0°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	20°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	25°	30	10	17	3	-111,435
eNodo B 3	Sector 1	0°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	25°	30	10	17	3	-111,435
eNodo B 4	Sector 1	0°	15°	30	8	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	20°	30	8	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	15°	30	10	17	3	-111,435
eNodo B 5	Sector 1	0°	18°	30	8	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	15°	30	8	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	18°	30	8	17	3	-111,435
eNodo B 6	Sector 1	70°	18°	30	6	17	3	-111,435
	Sector	190°	18°	30	10	17	3	-111,435

	2							
	<b>Sector 3</b>	310°	18°	30	6	17	3	-111,435

**Tabla 9.6. Configuración para cada sector del caso 2 en RadioGIS, usando el modelo COST-231**

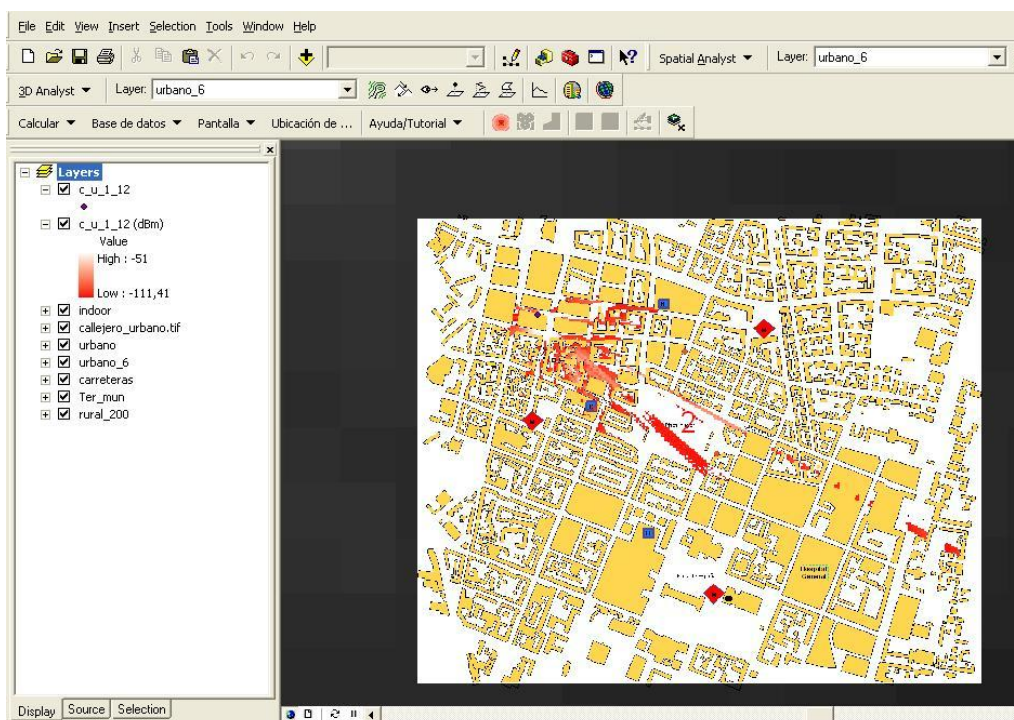
Observamos seguidamente las coberturas obtenidas para los 6 eNodos B de este caso, dadas de la Figura 9.85 a la 9.110.

### Emplazamiento 1

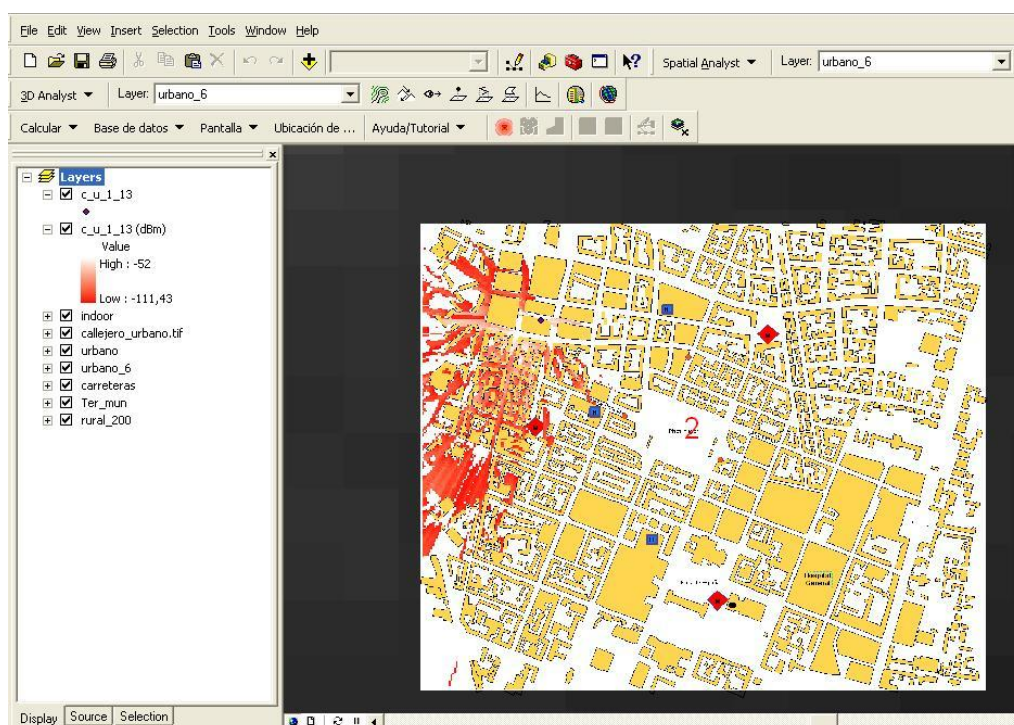


**Figura 9.85. Cobertura de primer sector (0°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

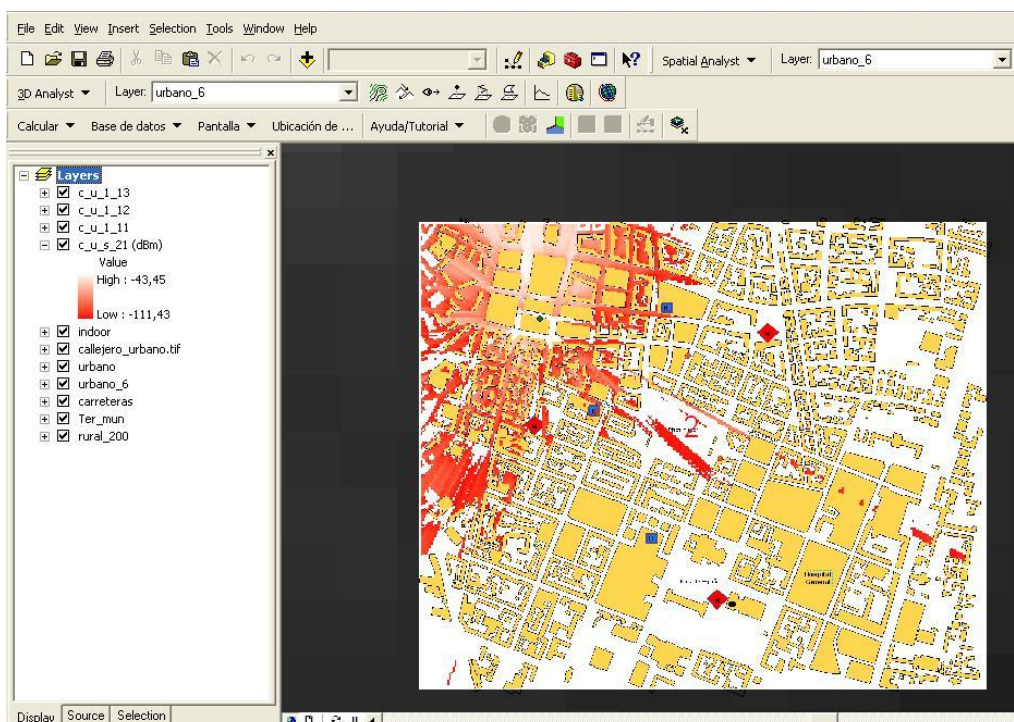




**Figura 9.86. Cobertura de segundo sector (120°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

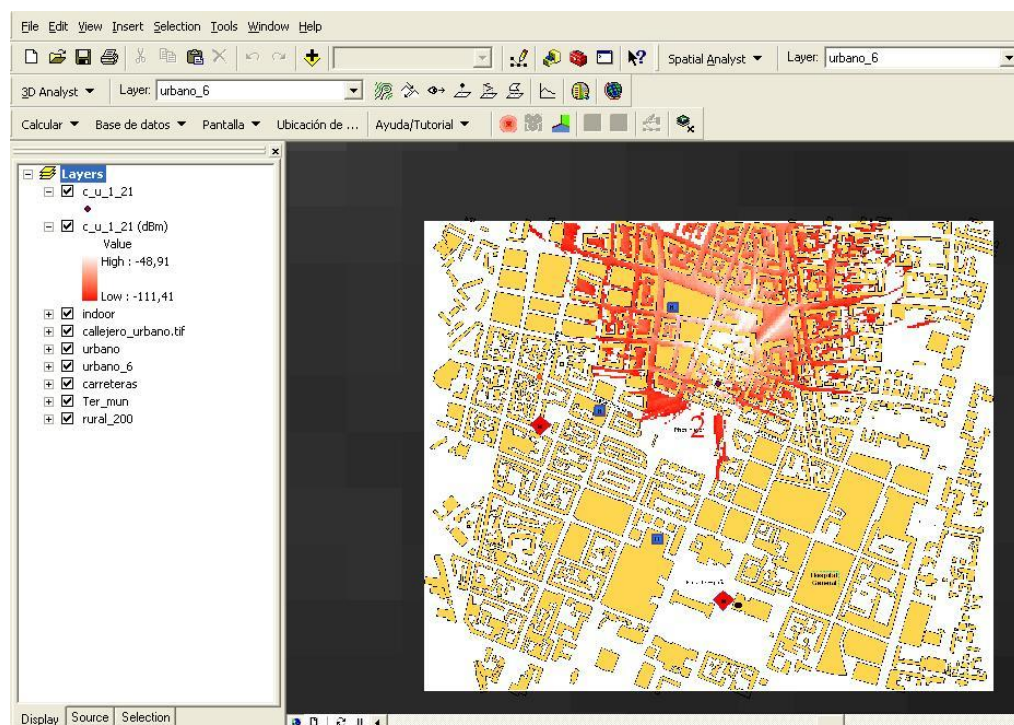


**Figura 9.87. Cobertura de tercer sector (240°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**



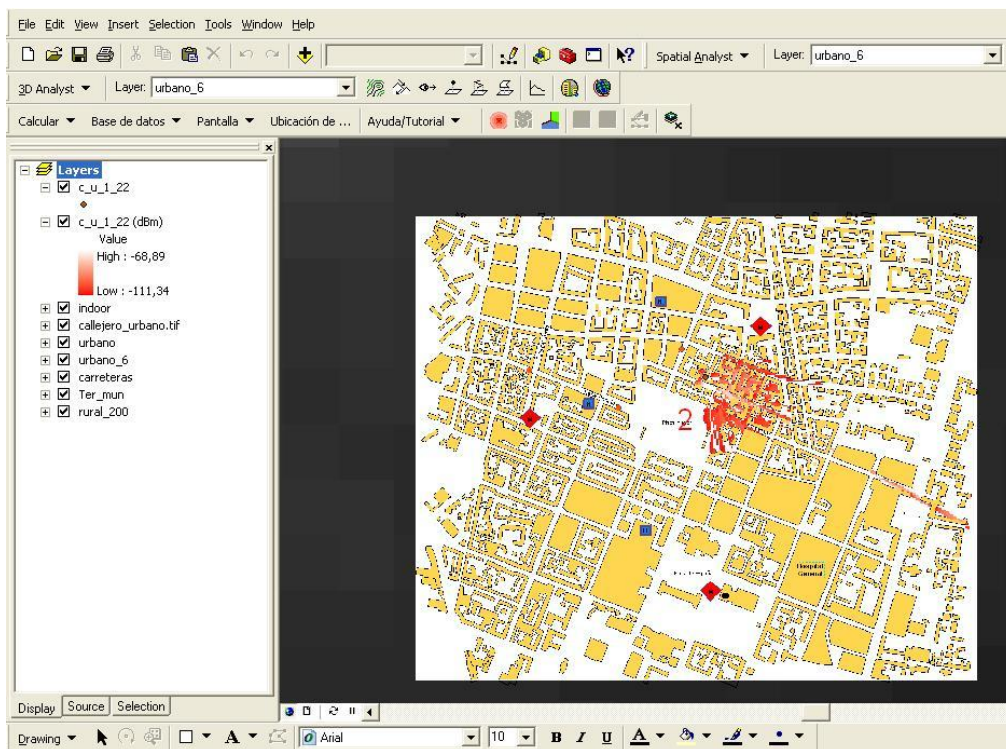
**Figura 9.88. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

Emplazamiento 2

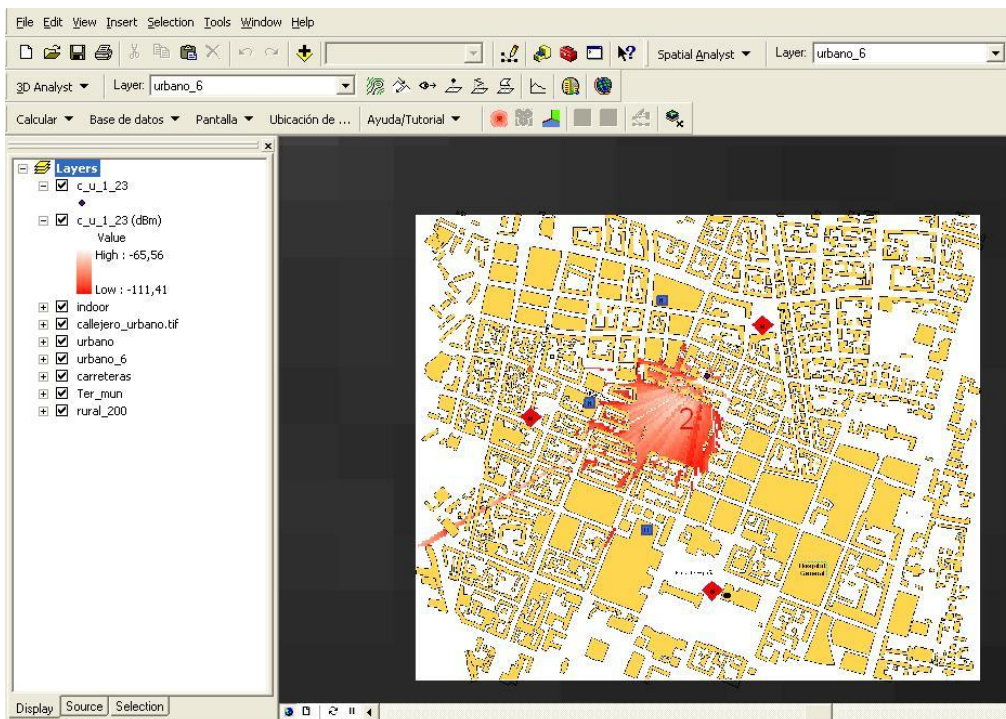


**Figura 9.89. Cobertura de primer sector (0°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

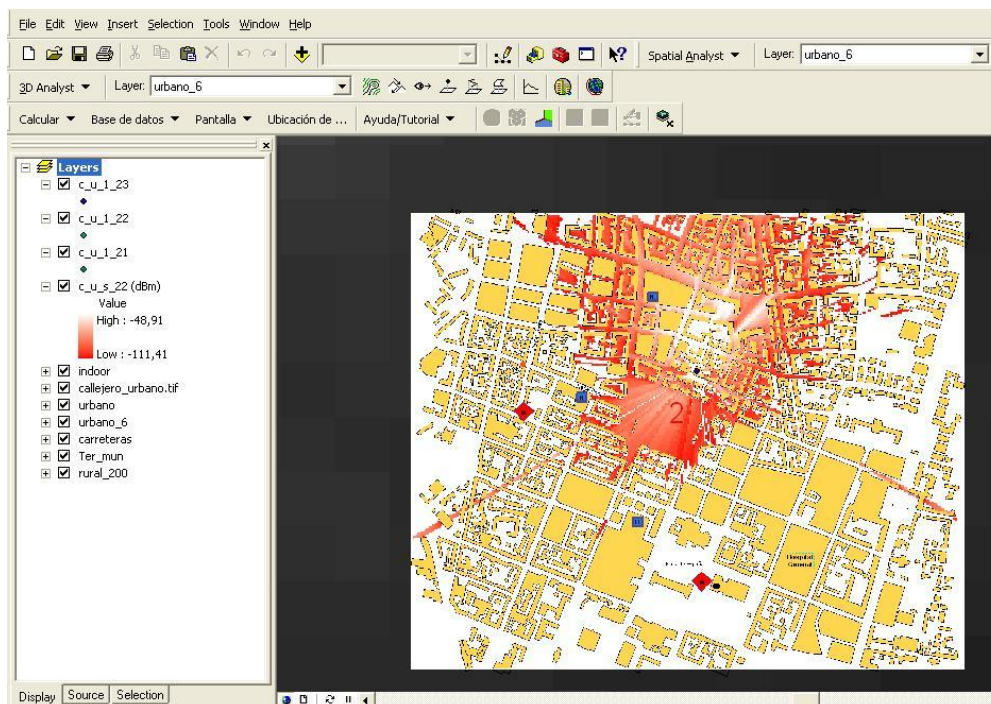




**Figura 9.90. Cobertura de segundo sector (120°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

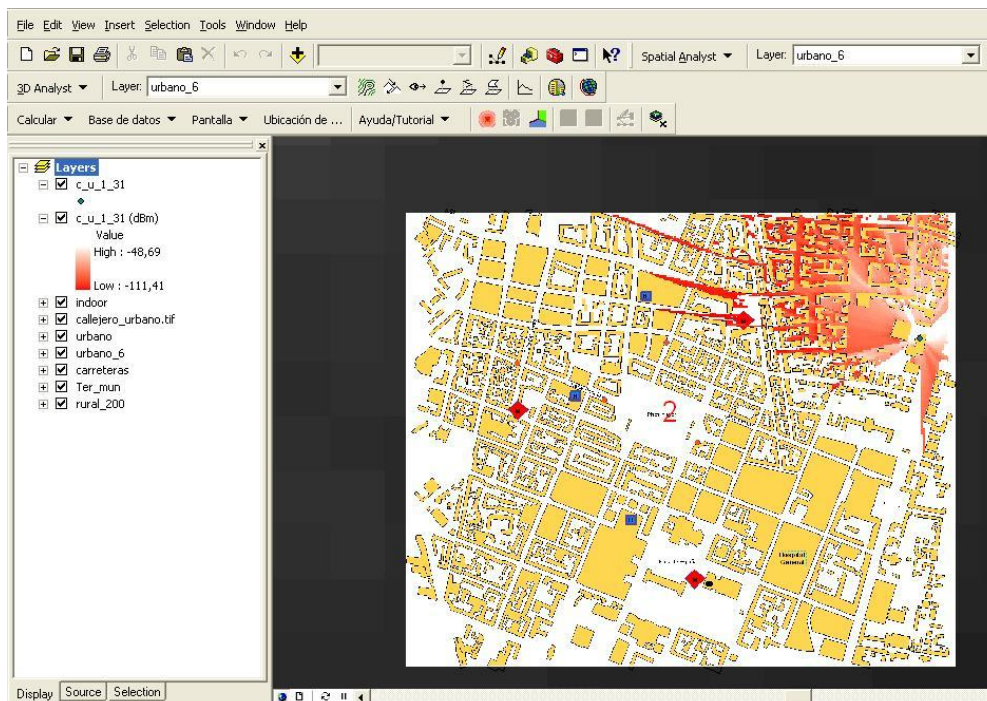


**Figura 9.91. Cobertura de tercer sector (240°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**



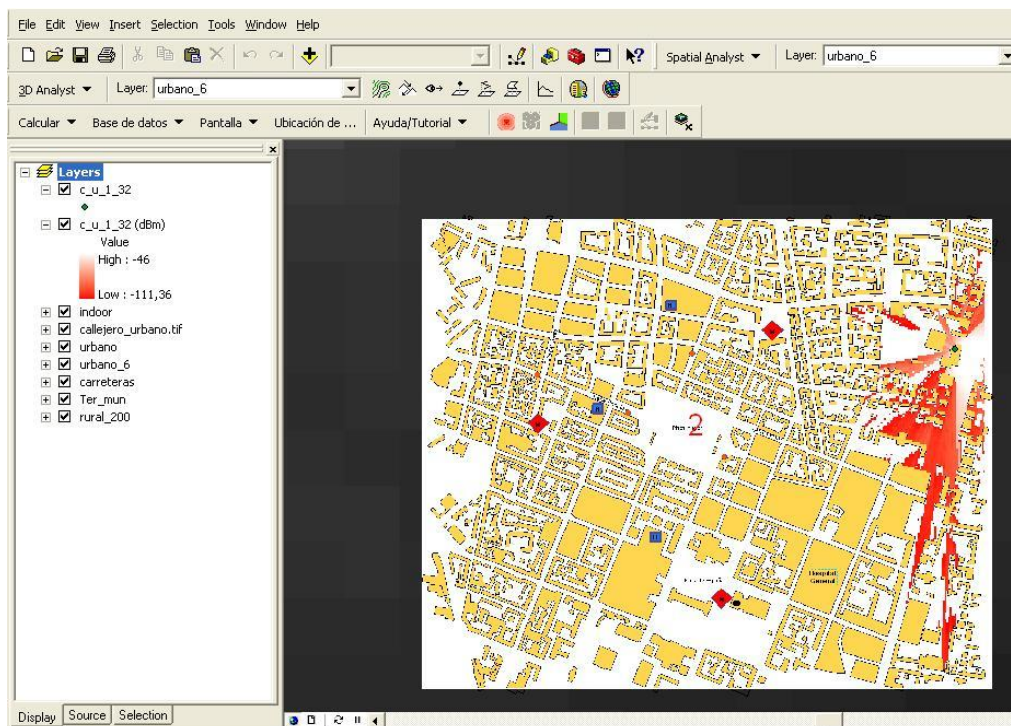
**Figura 9.92. Cobertura total proporcionada por segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

### Emplazamiento 3

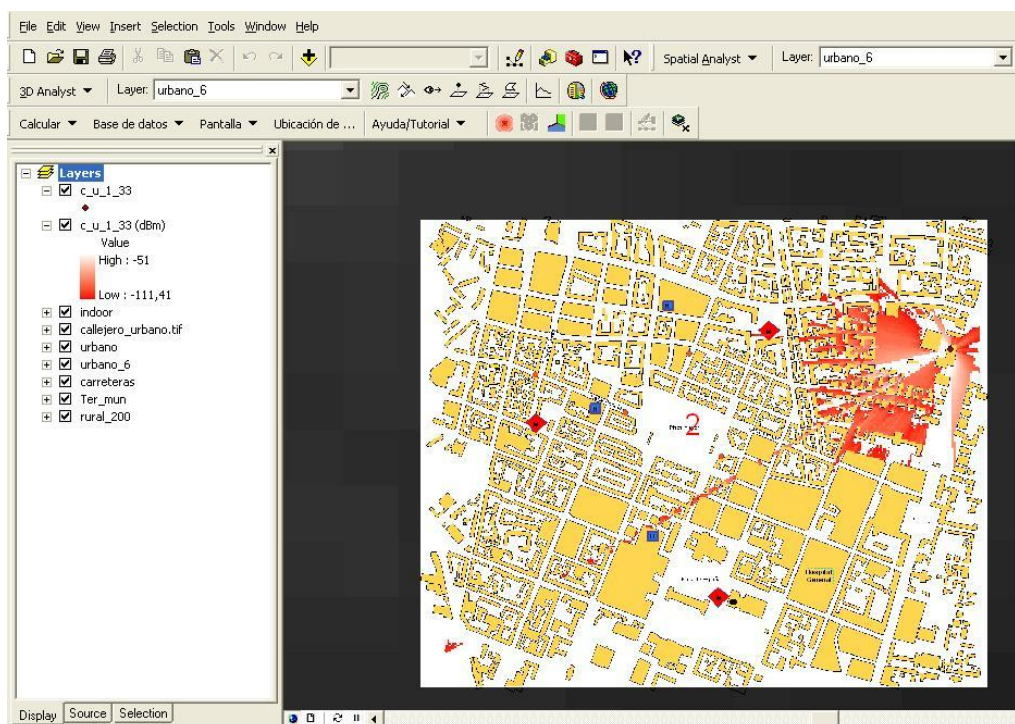


**Figura 9.93. Cobertura de primer sector (0°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**



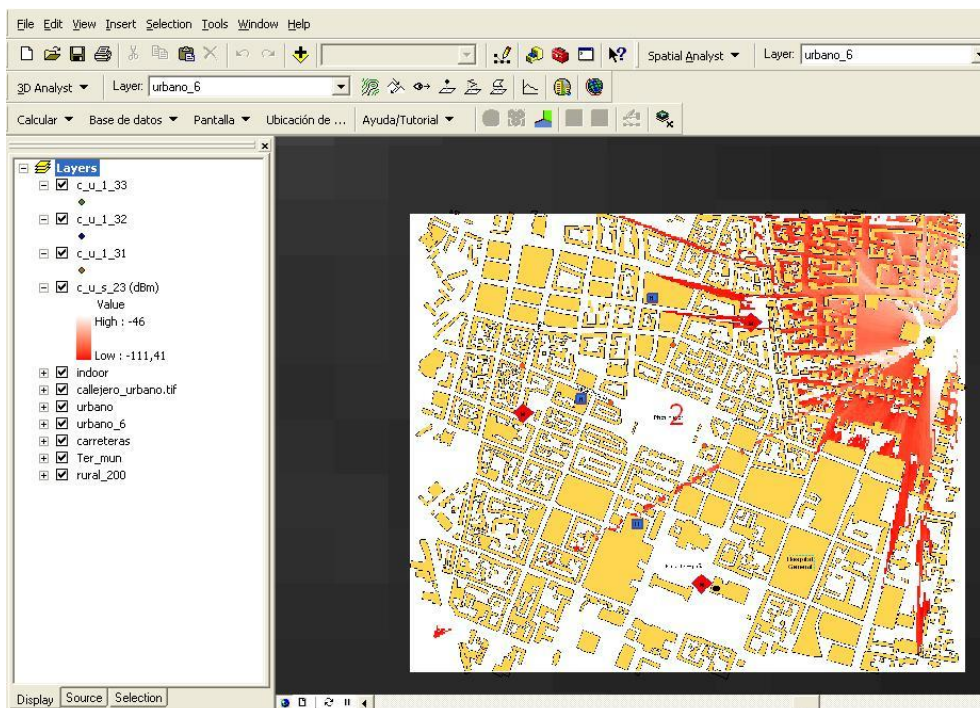


**Figura 9.94. Cobertura de segundo sector (120°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**



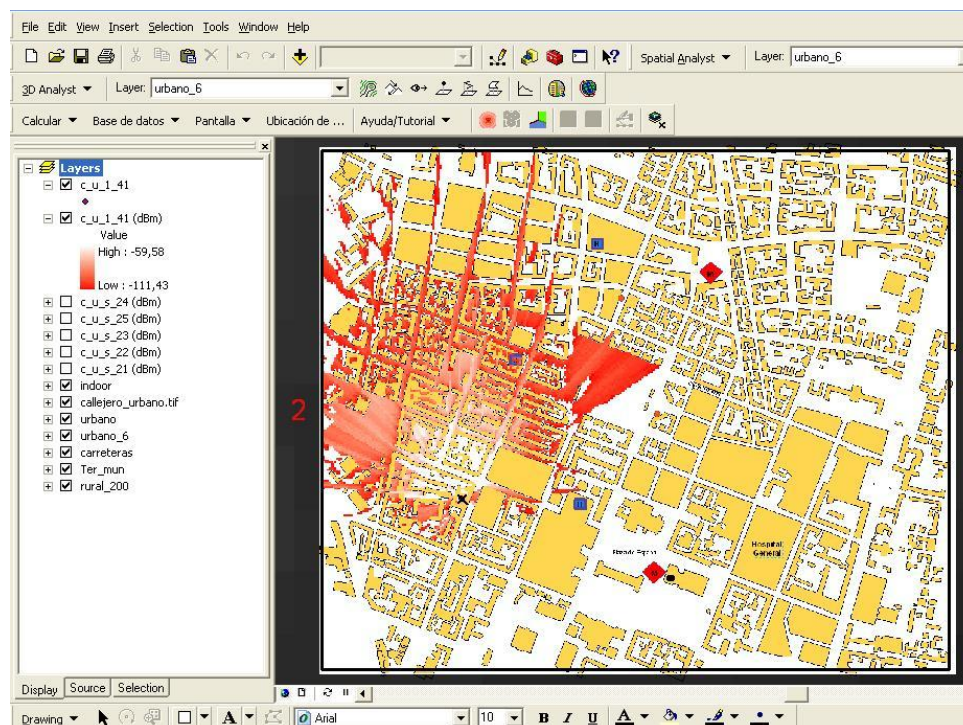
**Figura 9.95. Cobertura de tercer sector (240°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**



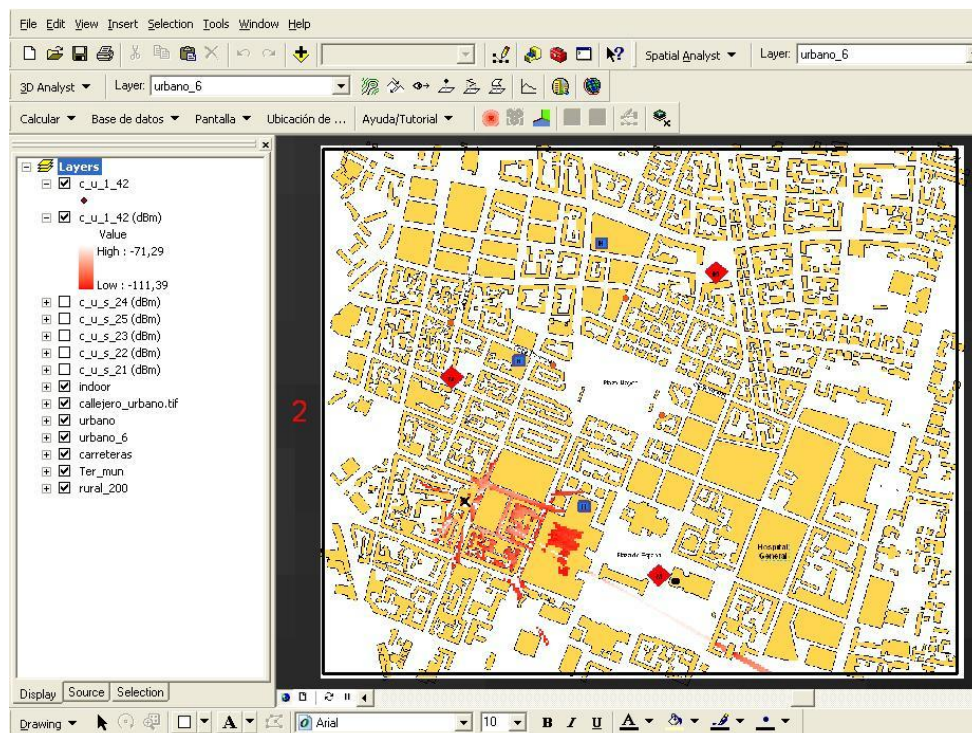


**Figura 9.96. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

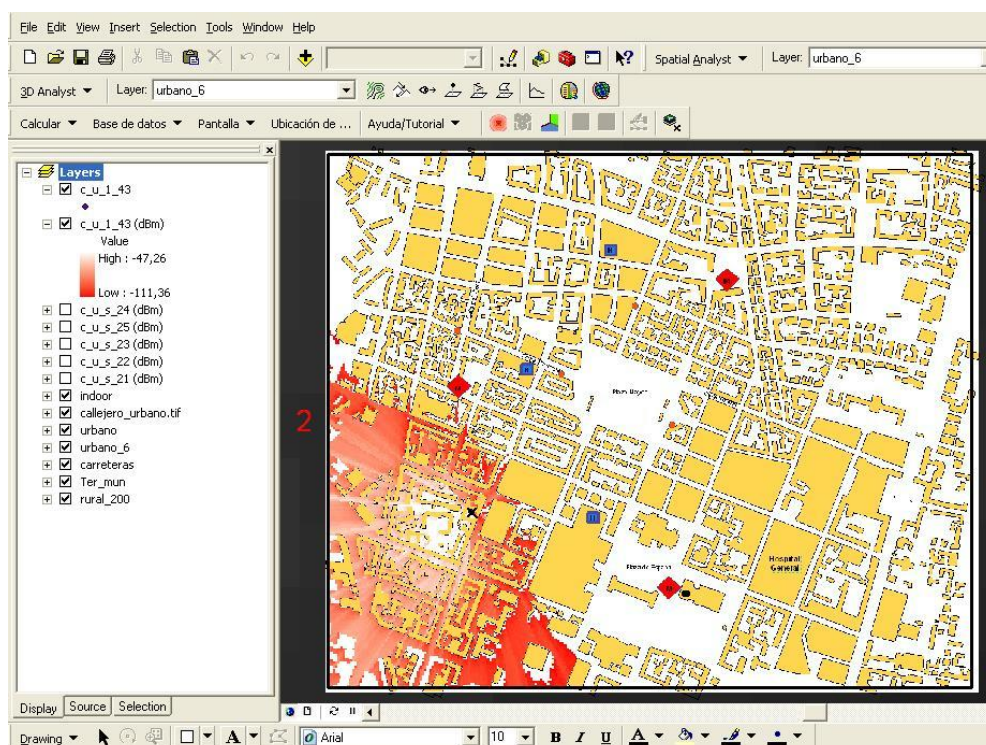
Emplazamiento 4



**Figura 9.97. Cobertura de primer sector (0°) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

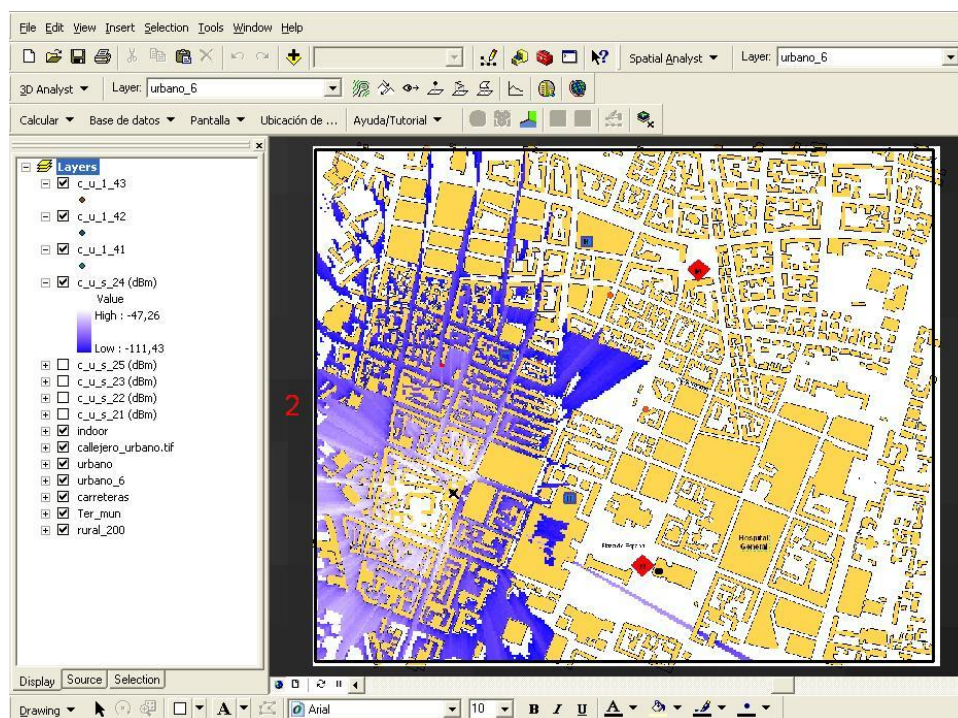


**Figura 9.98. Cobertura de segundo sector (120°) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**



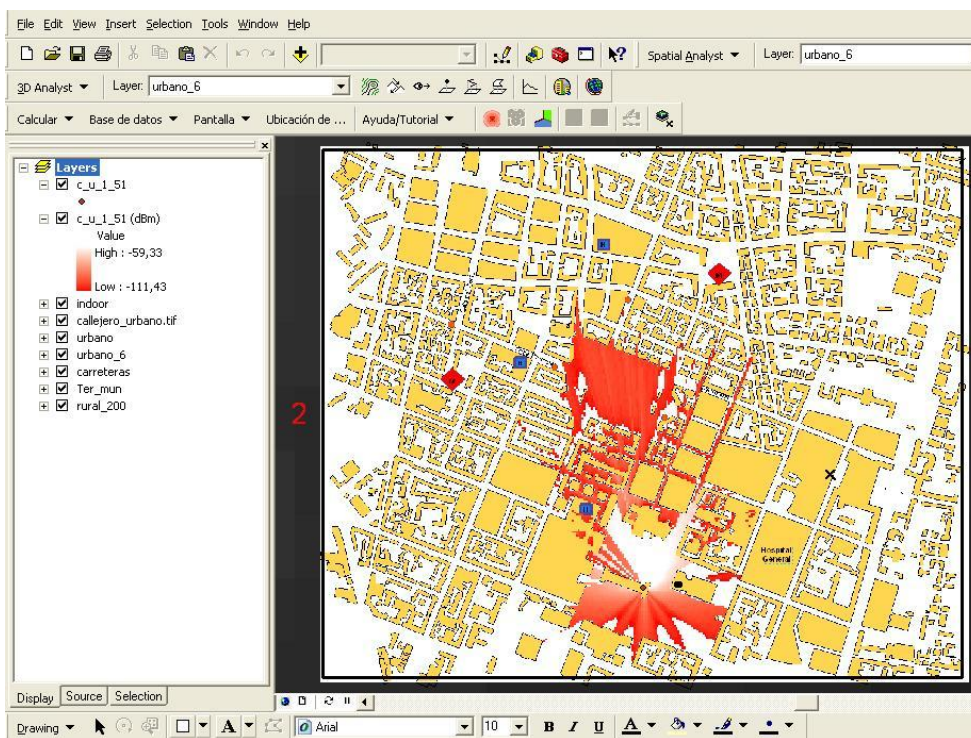
**Figura 9.99. Cobertura de tercer sector (240°) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**





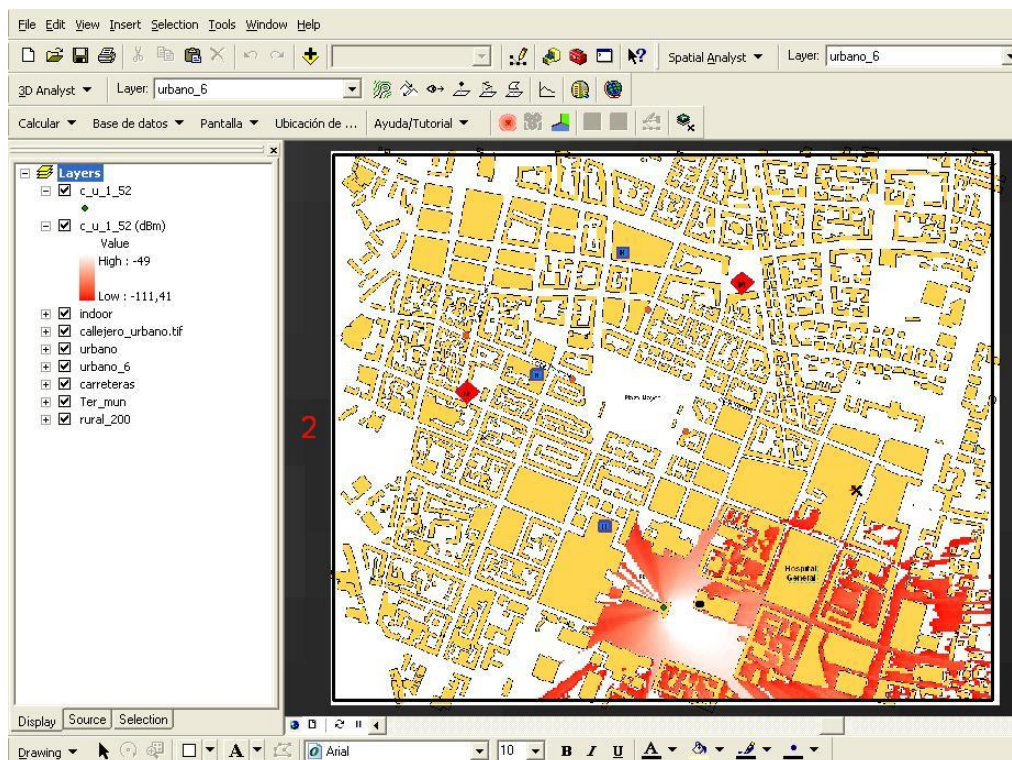
**Figura 9.100. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

Emplazamiento 5

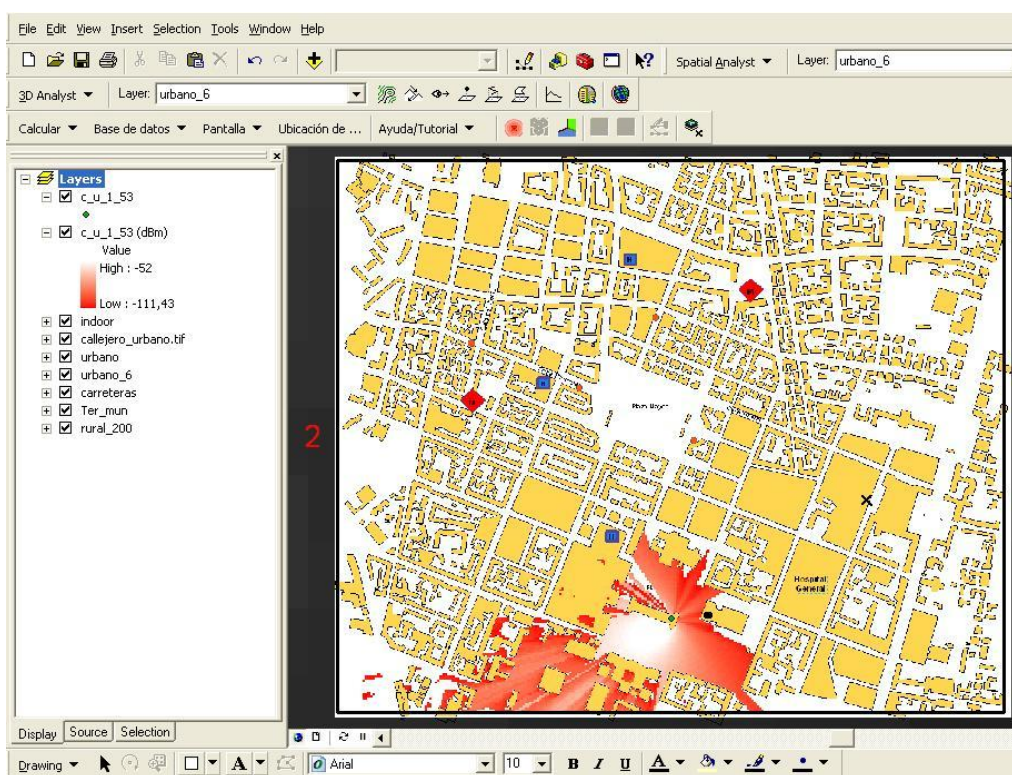


**Figura 9.101. Cobertura de primer sector (0°) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**



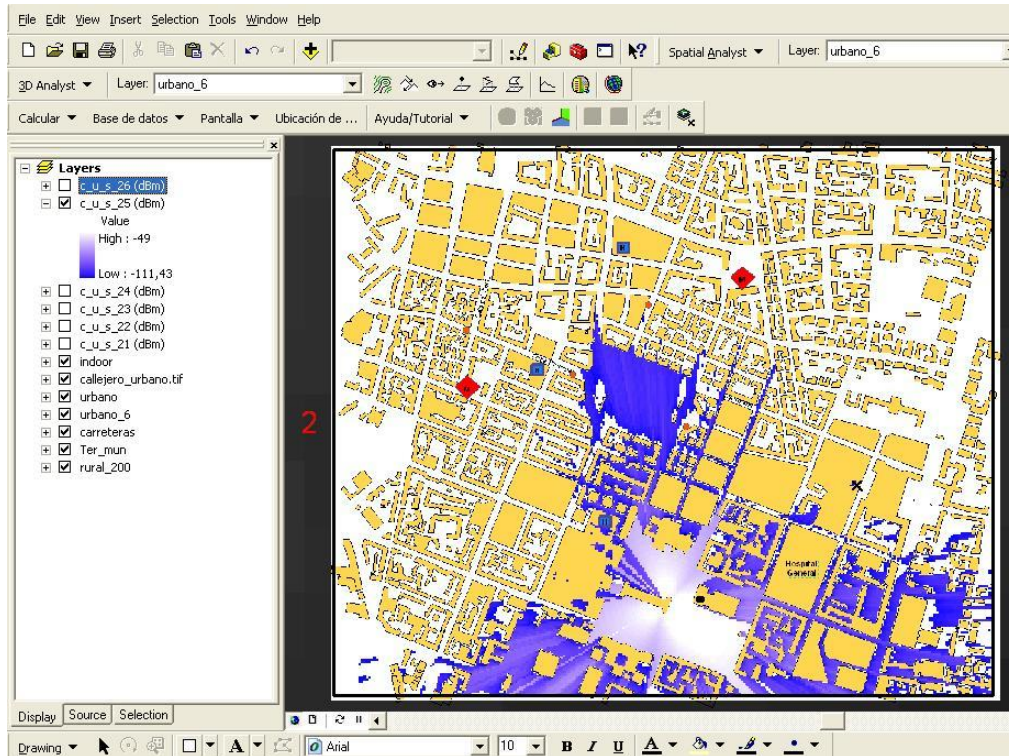


**Figura 9.102. Cobertura de segundo sector (120°) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.103. Cobertura de tercer sector (240°) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

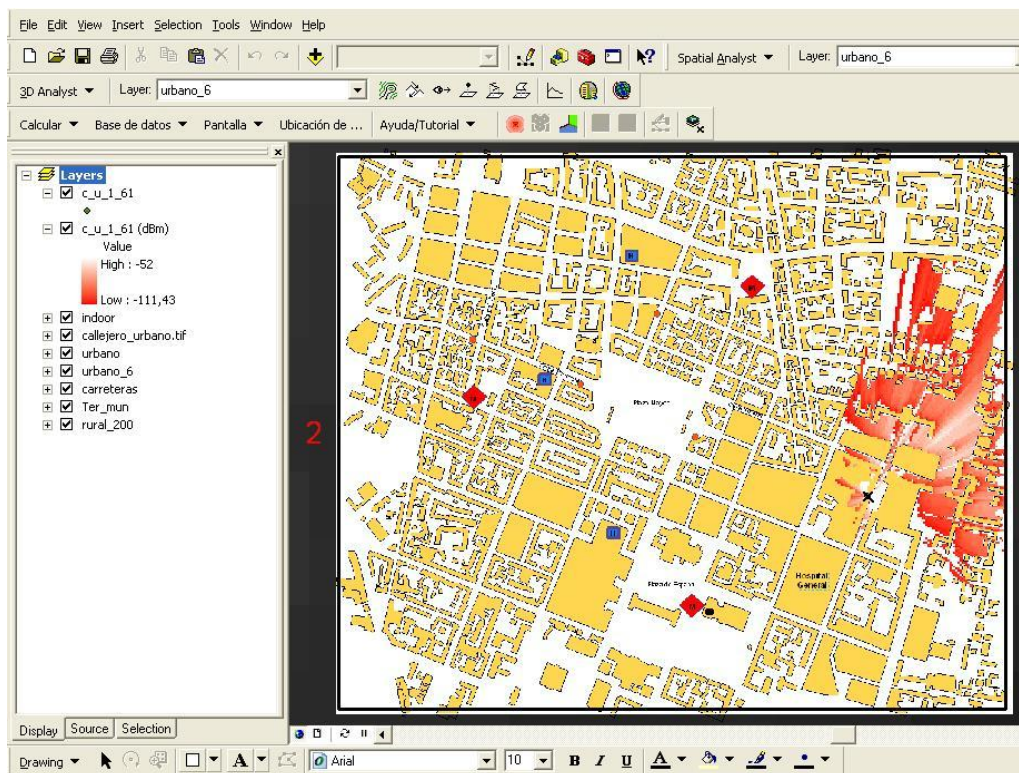




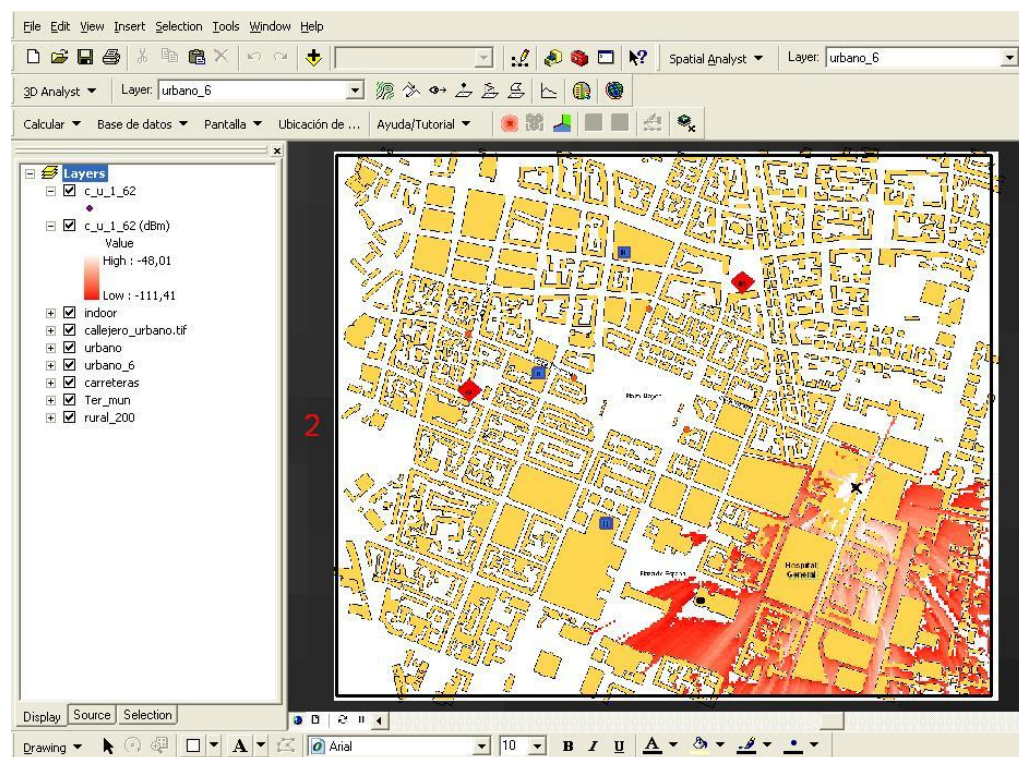
**Figura 9.104. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

### Emplazamiento 6

En este emplazamiento la variable acimutal toma valores distintos a los que se asignaban a los sectores anteriores ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ ), siendo estos ahora  $50^\circ$  en el primer sector,  $170^\circ$  el segundo y  $290^\circ$  el tercero y último. Esto se debe a que, de otra manera, este emplazamiento no nos daba la cobertura requerida.

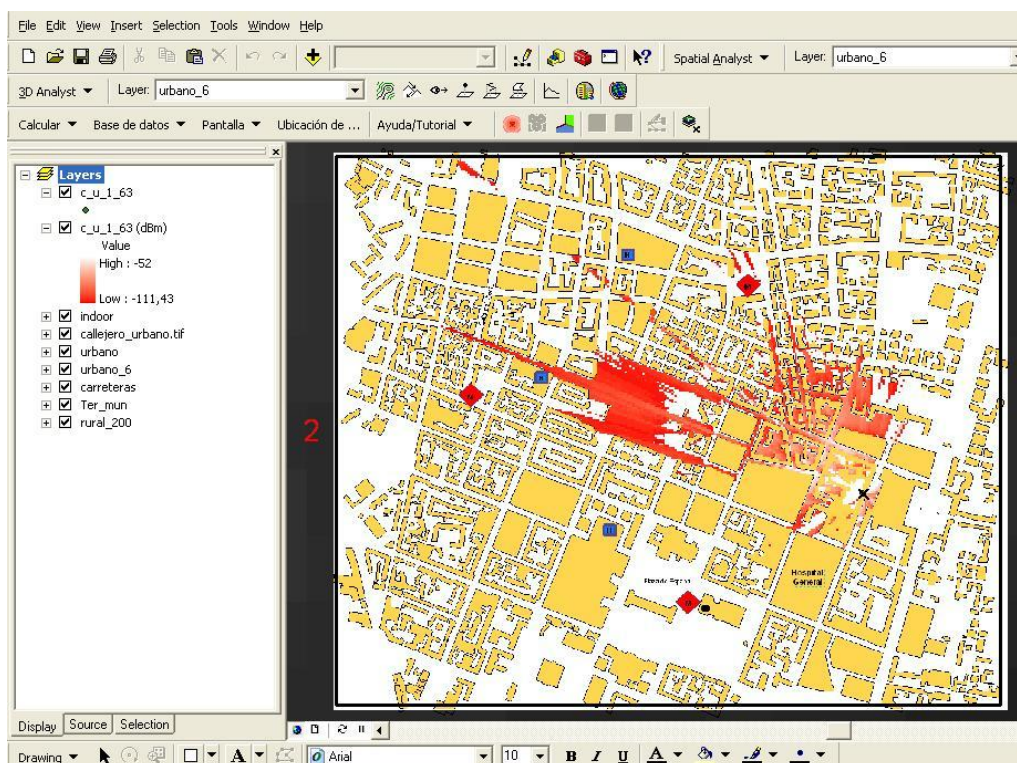


**Figura 9.105. Cobertura de primer sector (50°) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

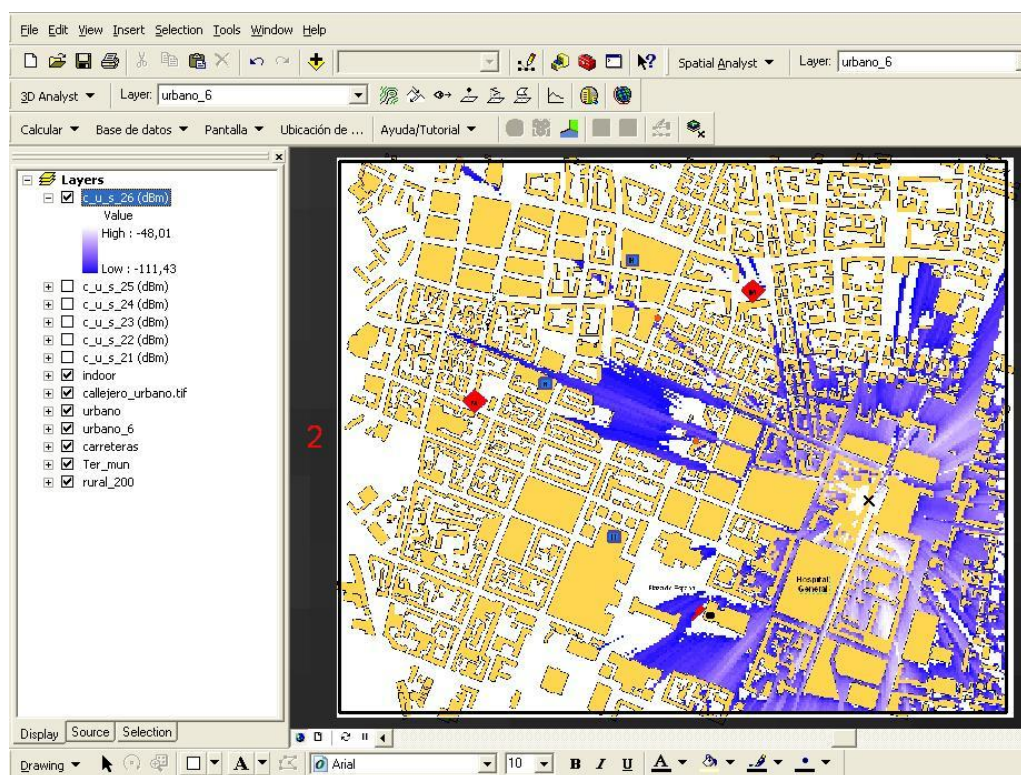


**Figura 9.106. Cobertura de segundo sector (170°) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**



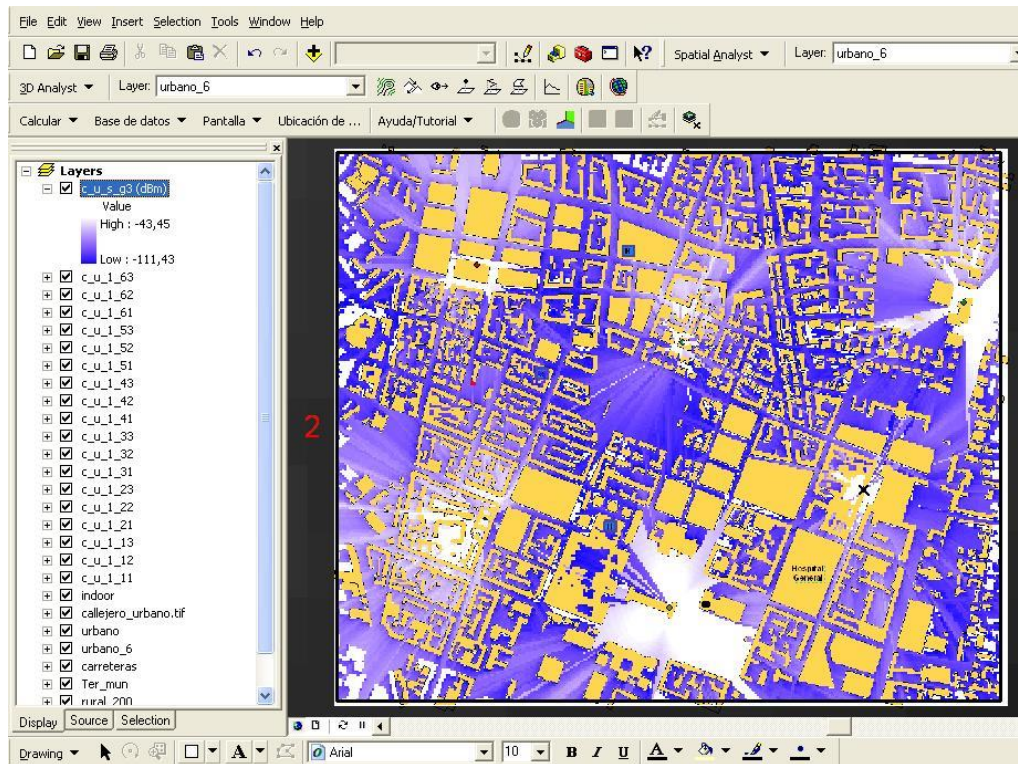


**Figura 9.107. Cobertura de tercer sector (290°) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.108. Cobertura total proporcionada por sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

En la Figura 9.109 tenemos la cobertura dada por el sistema de los 6 eNodos B del caso 2.



**Figura 9.109. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 2 en entorno urbano, con COST-231**

La zona de servicio queda también cubierta plenamente en este caso, donde vemos que las zonas más clareadas son los puntos donde la potencia recibida será mayor. En la Figura 9.110 tenemos el mapa de mejor servidor.





*Apartado 9 – Ubicación óptima de eNodos B.*

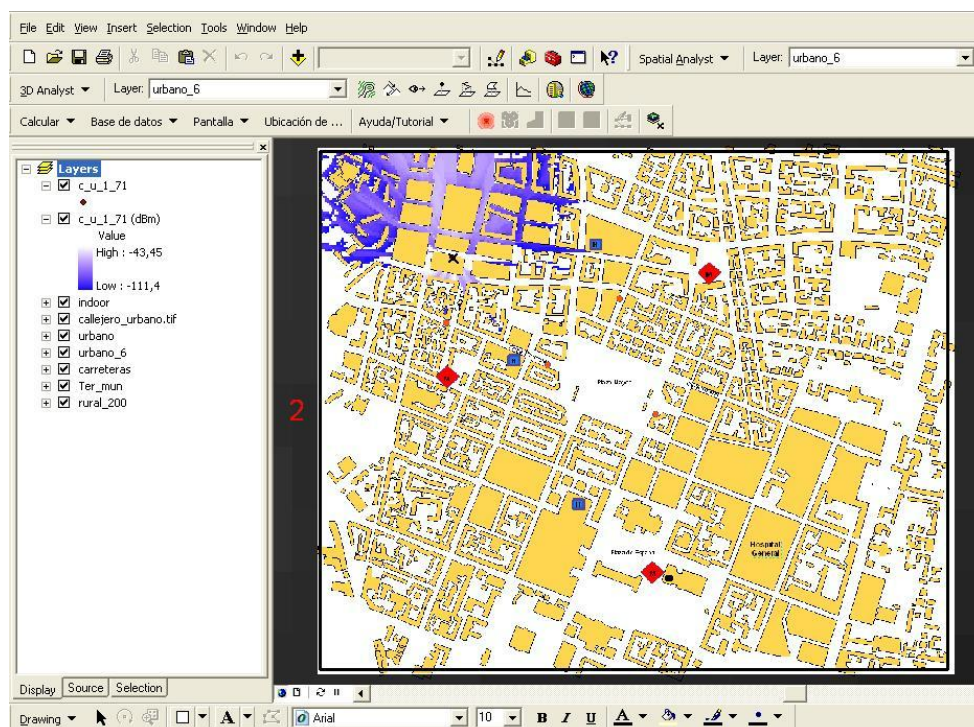
	<b>Sector 3</b>	240°	15°	30	10	17	3	-111,435
<b>eNodo B 3</b>	<b>Sector 1</b>	0°	15°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	10°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	15°	30	10	17	3	-111,435
<b>eNodo B 4</b>	<b>Sector 1</b>	0°	18°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	18°	30	8	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	10°	30	15	17	3	-111,435
<b>eNodo B 5</b>	<b>Sector 1</b>	0°	18°	30	8	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	15°	30	8	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	18°	30	8	17	3	-111,435
<b>eNodo B 6</b>	<b>Sector 1</b>	70°	10°	30	15	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	190°	10°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	310°	15°	30	6	17	3	-111,435

**Tabla 9.7. Configuración para cada sector del caso 2 en RadioGIS, usando el modelo Har-Xia-Bertoni**

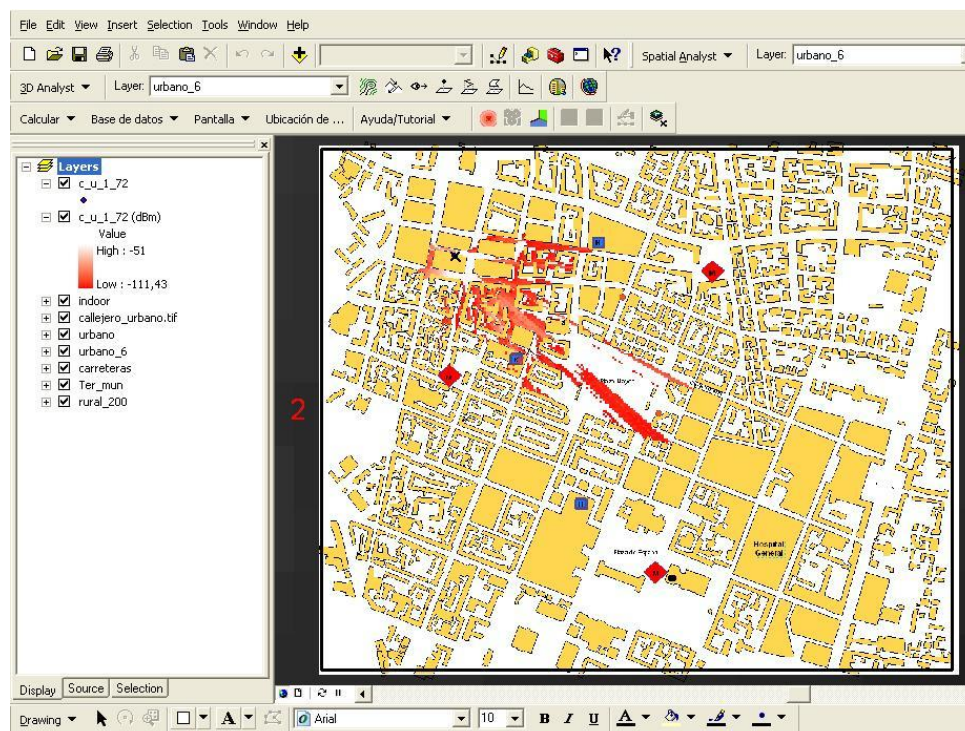
De nuevo aquí representamos con sombreado amarillo las diferencias respecto al análisis con el modelo de propagación COST-231.

Observamos seguidamente las coberturas obtenidas para los 6 eNodos B de este caso, dadas de la Figura 9.111 a la 9.136.

Emplazamiento 1

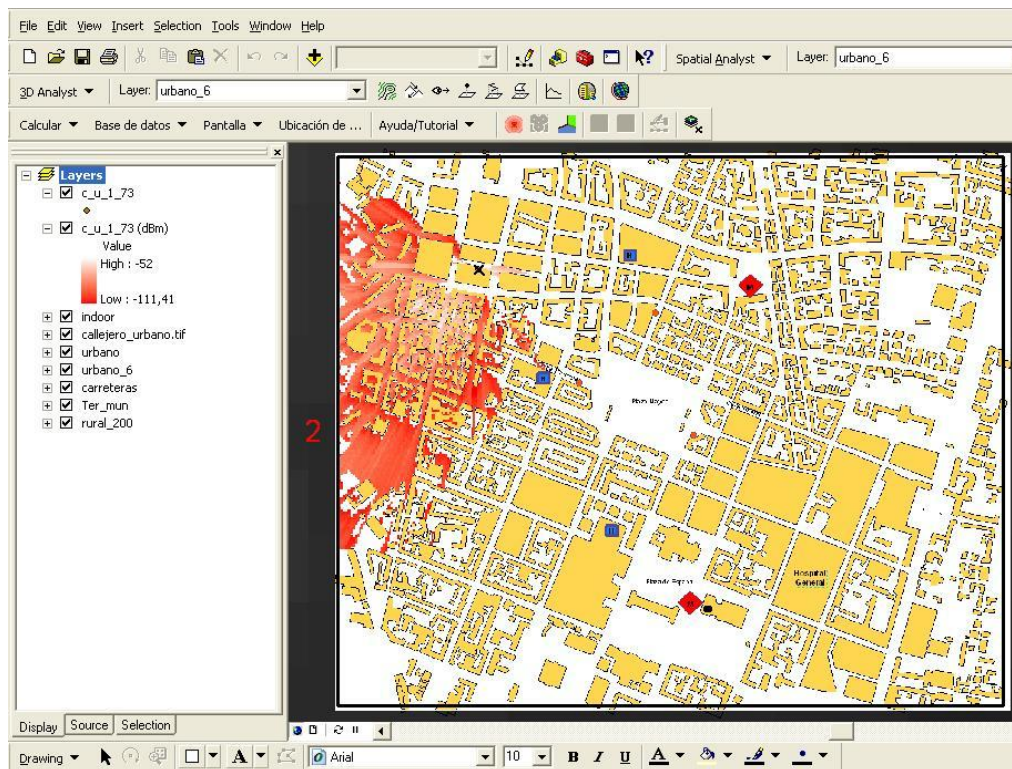


**Figura 9.111. Cobertura de primer sector (0°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

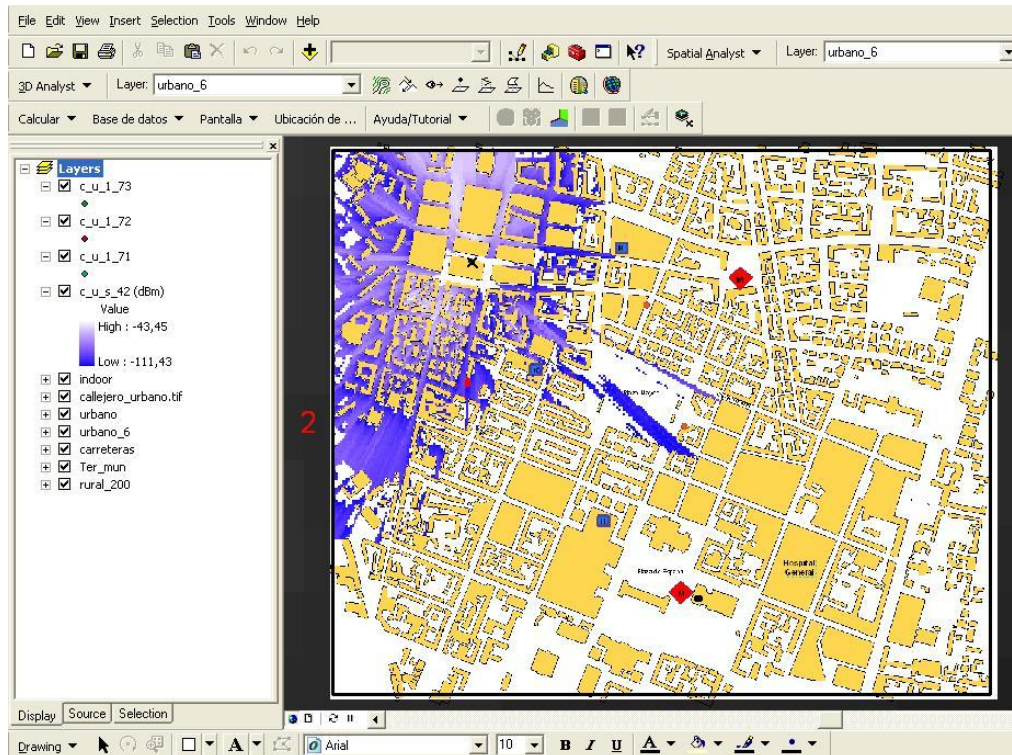


**Figura 9.112. Cobertura de segundo sector (120°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**





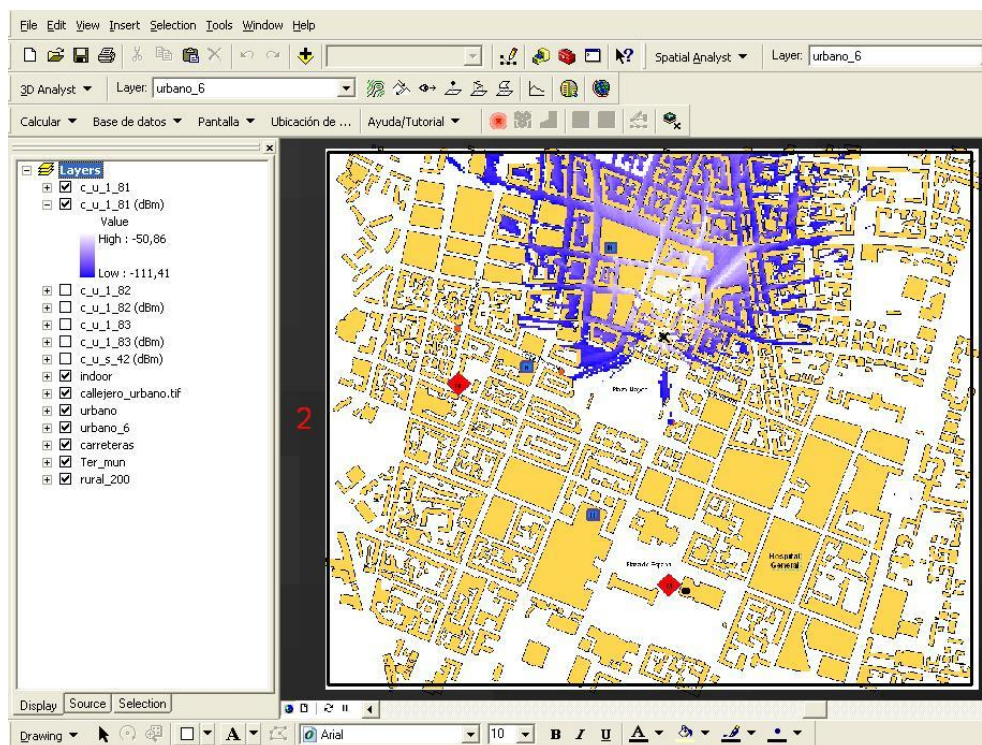
**Figura 9.113. Cobertura de tercer sector (240°) de primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



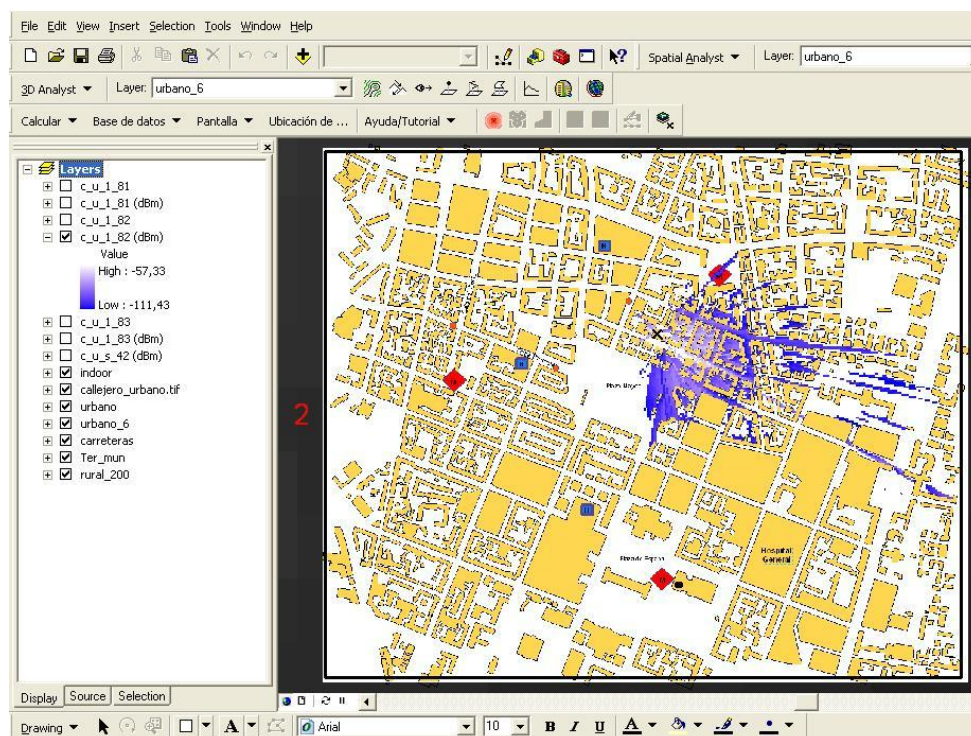
**Figura 9.114. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



Emplazamiento 2

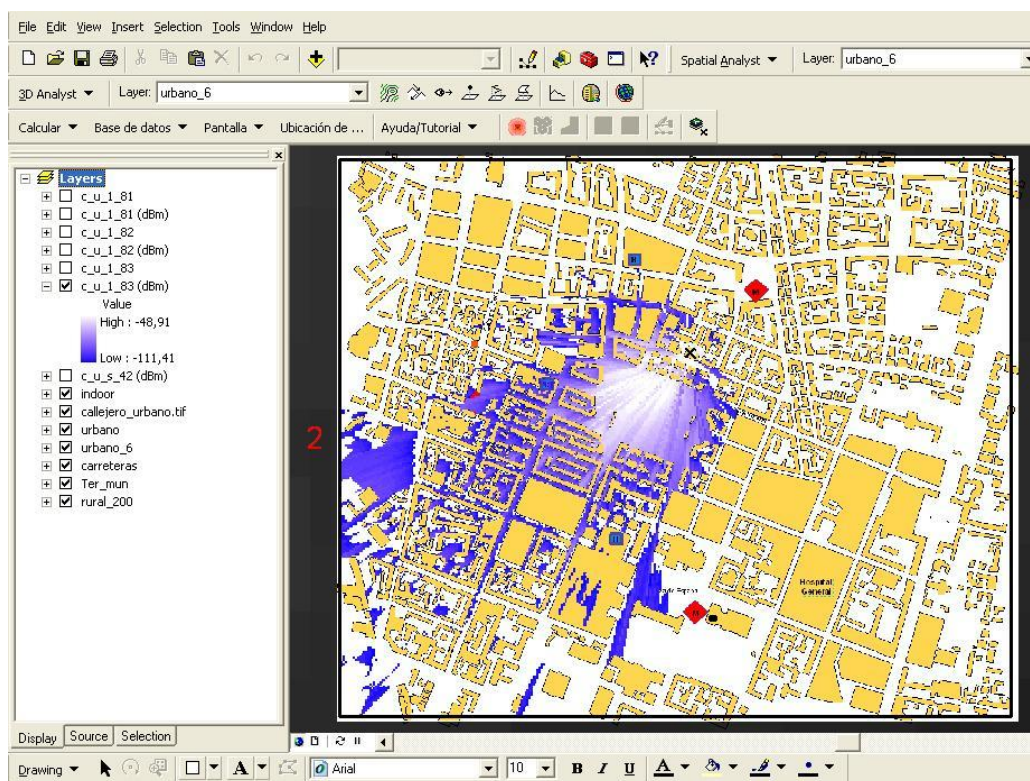


**Figura 9.115. Cobertura de primer sector (0°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

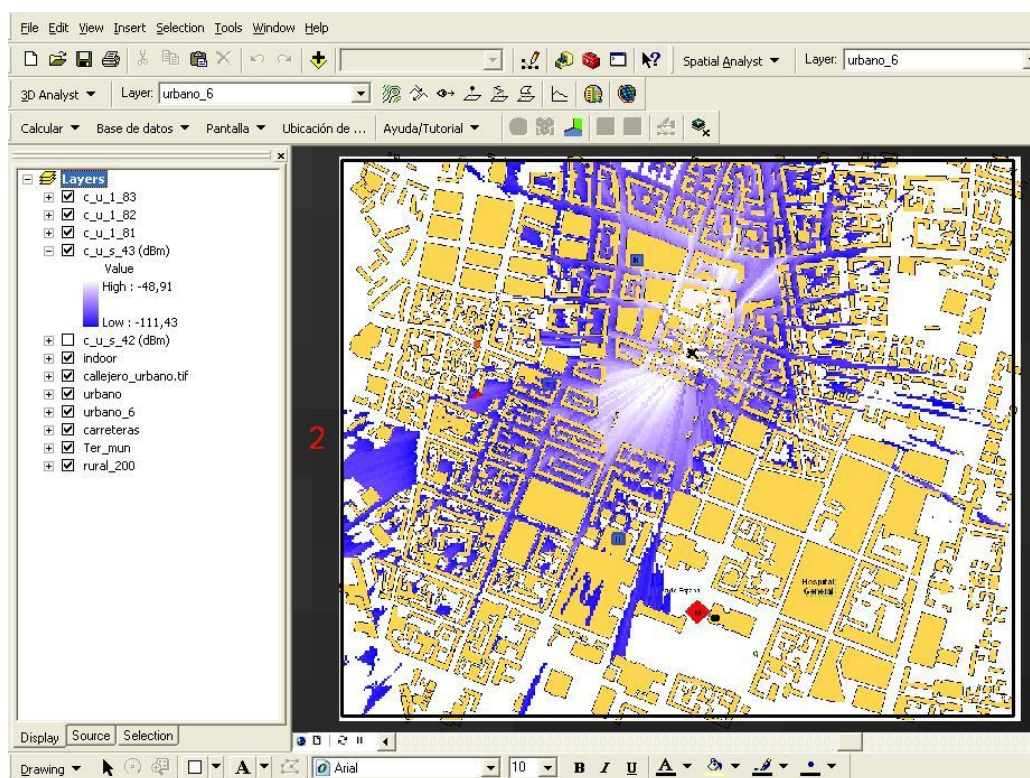


**Figura 9.116. Cobertura de segundo sector (120°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**





**Figura 9.117. Cobertura de tercer sector (240°) de segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



**Figura 9.118. Cobertura total proporcionada por segundo emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



Emplazamiento 3

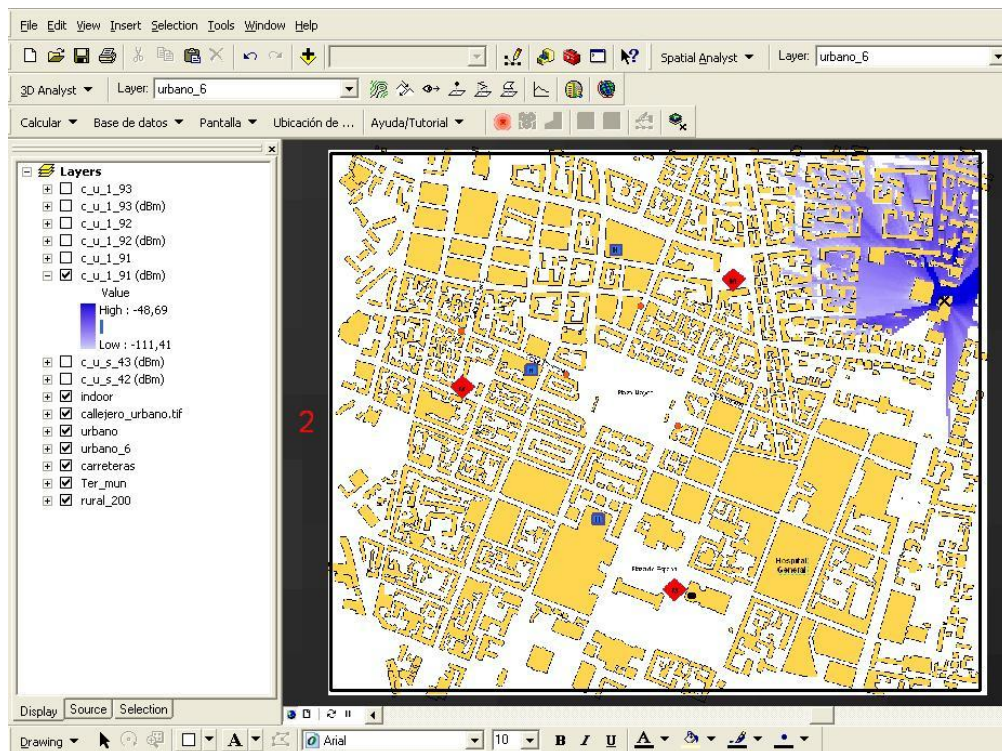


Figura 9.119. Cobertura de primer sector (0°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

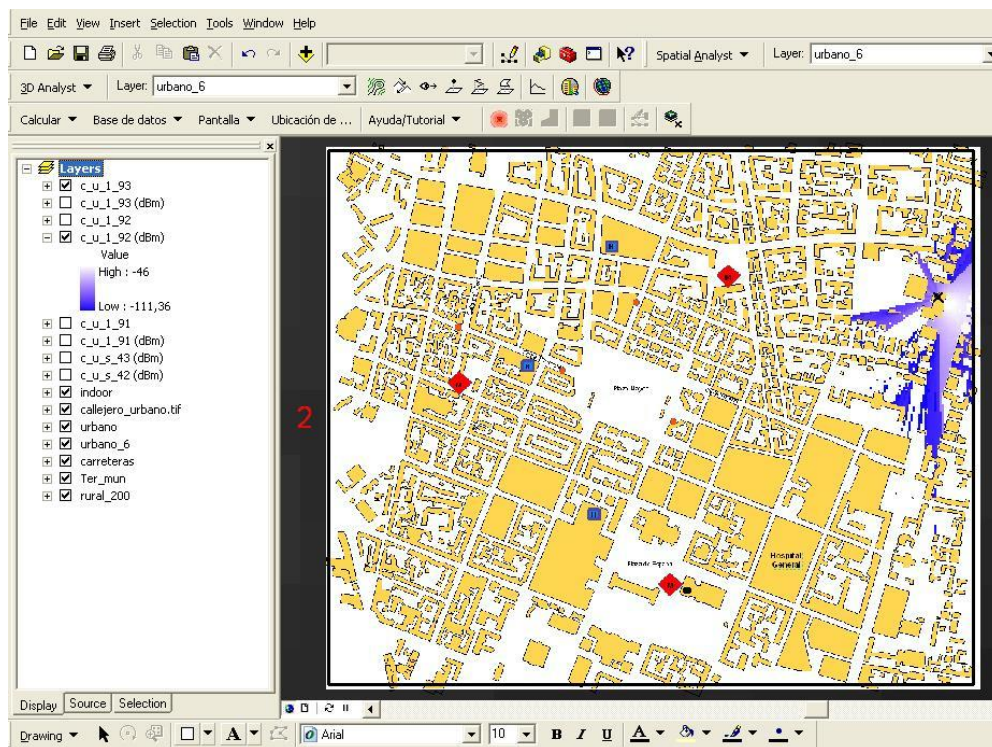
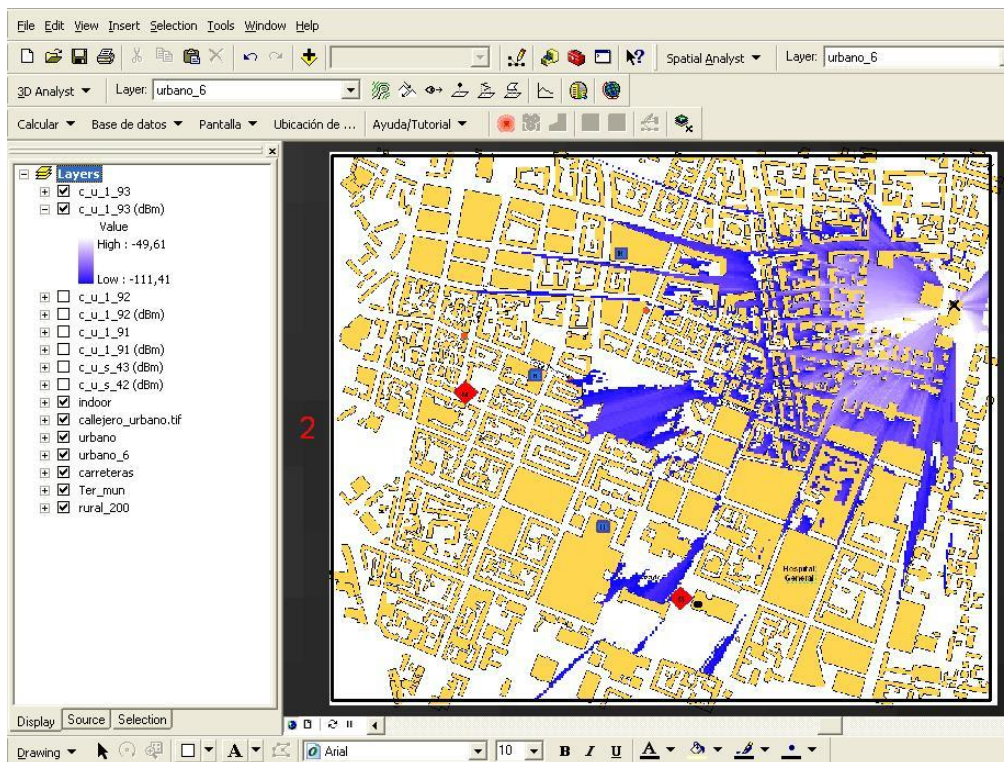
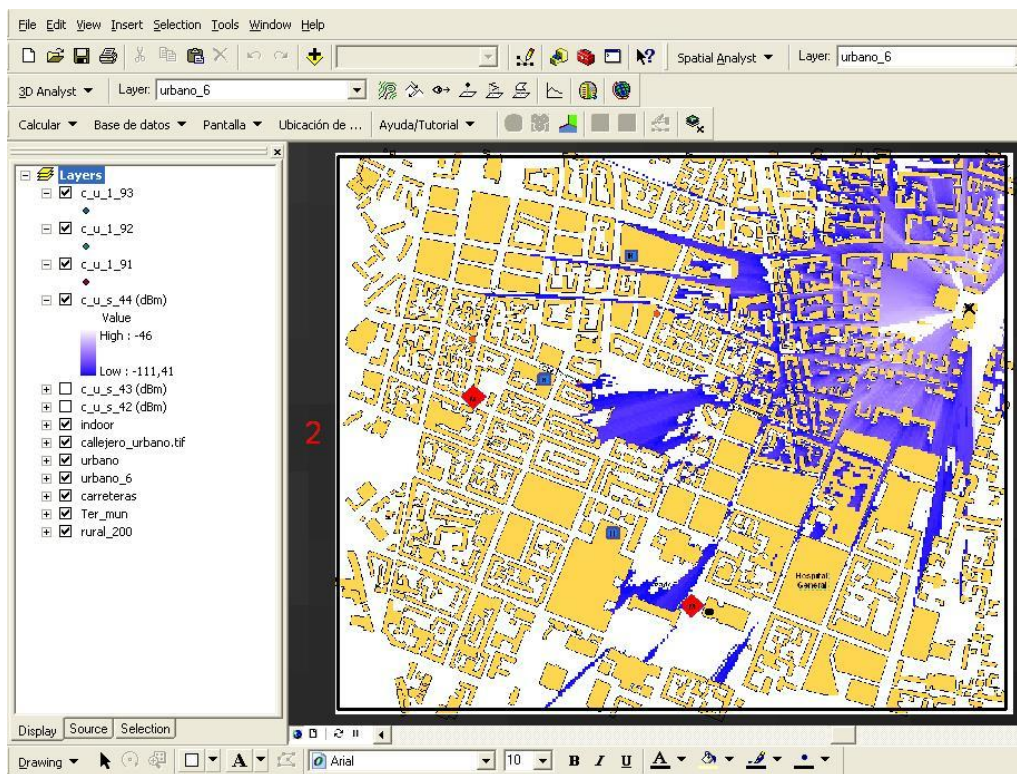


Figura 9.120. Cobertura de segundo sector (120°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni





**Figura 9.121. Cobertura de tercer sector (240°) de tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



**Figura 9.122. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



Emplazamiento 4

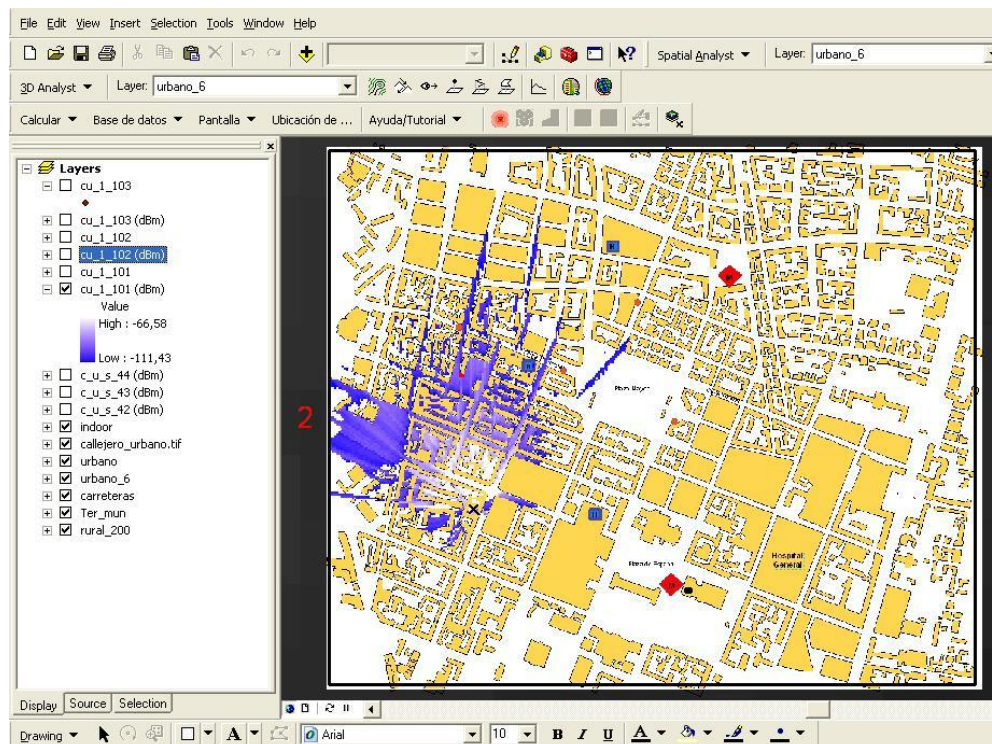


Figura 9.123. Cobertura de primer sector ( $0^\circ$ ) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

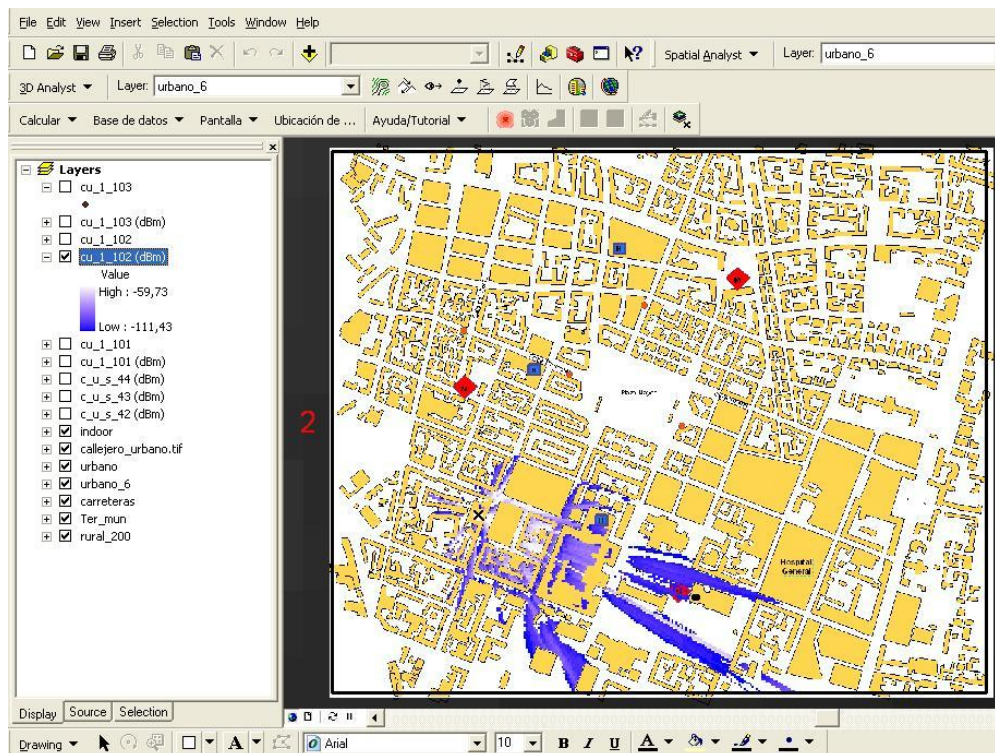
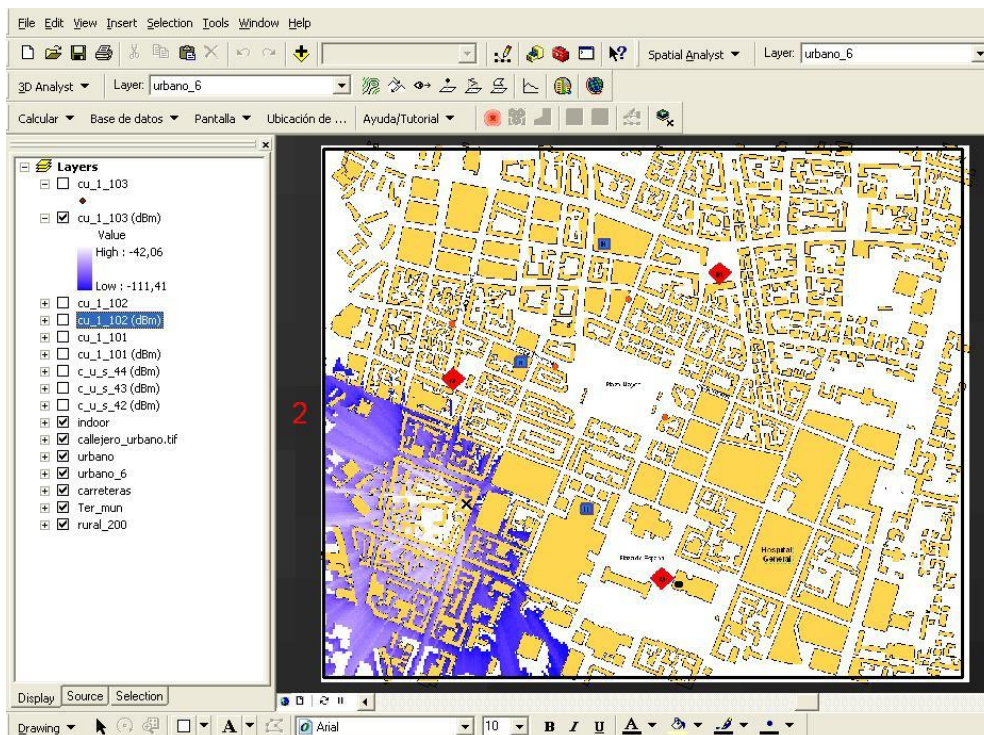
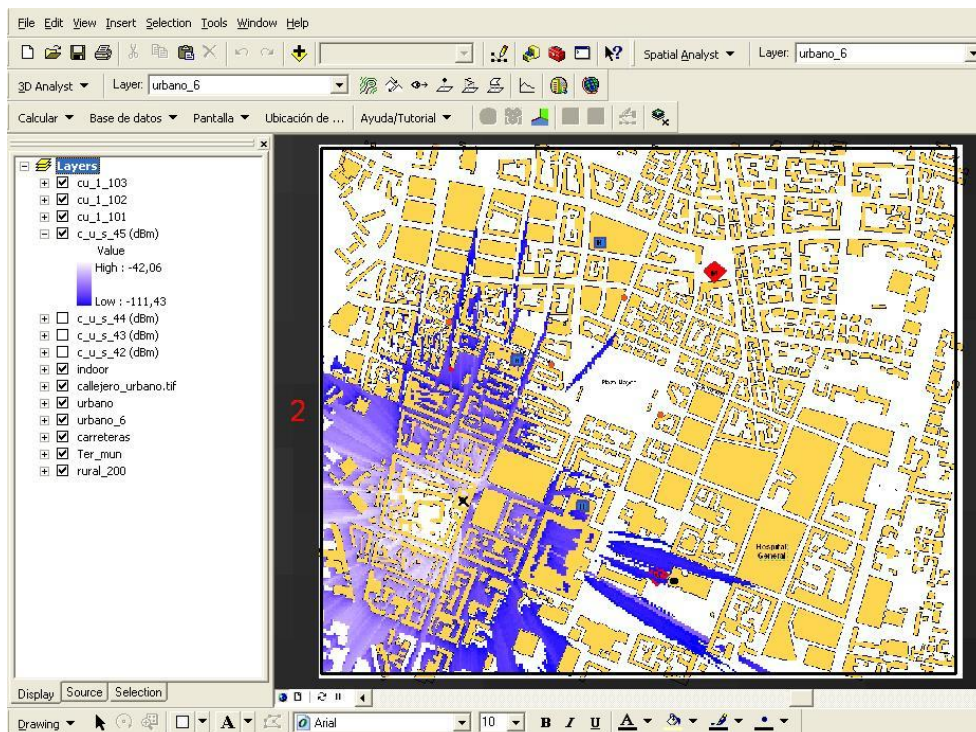


Figura 9.124. Cobertura de segundo sector ( $120^\circ$ ) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni





**Figura 9.125. Cobertura de tercer sector (240°) de cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



**Figura 9.126. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



Emplazamiento 5

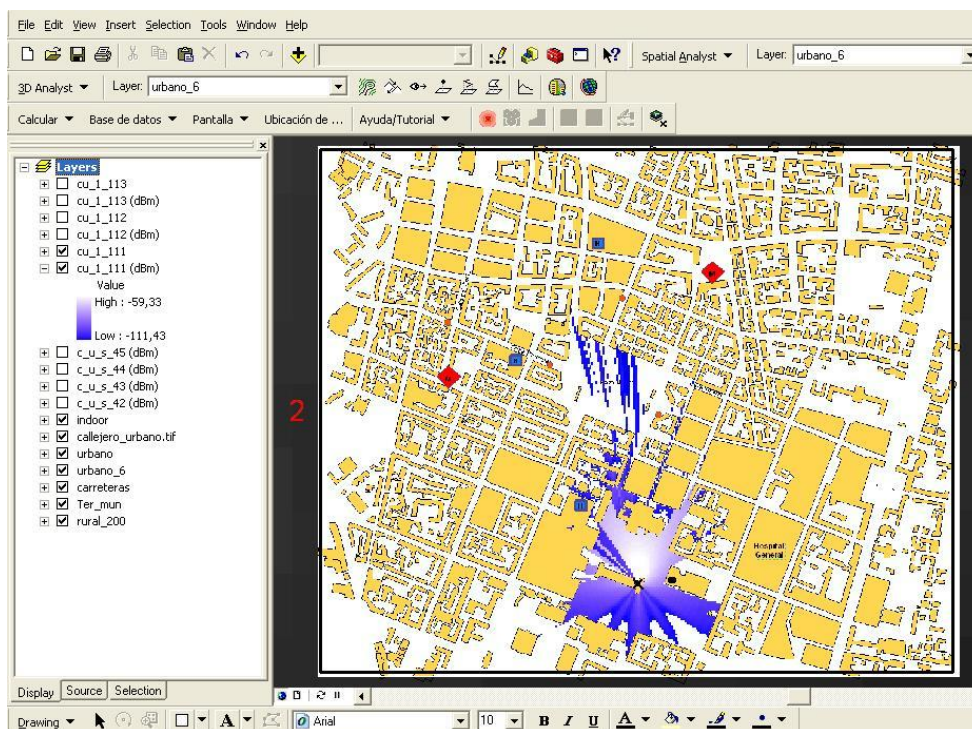


Figura 9.127. Cobertura de primer sector (0°) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

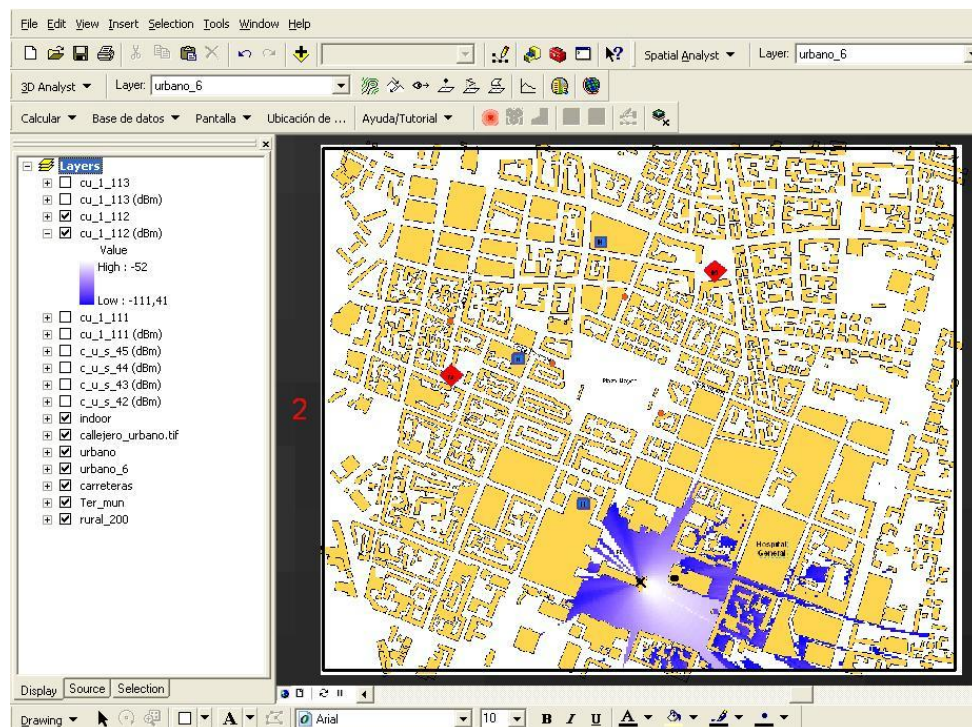
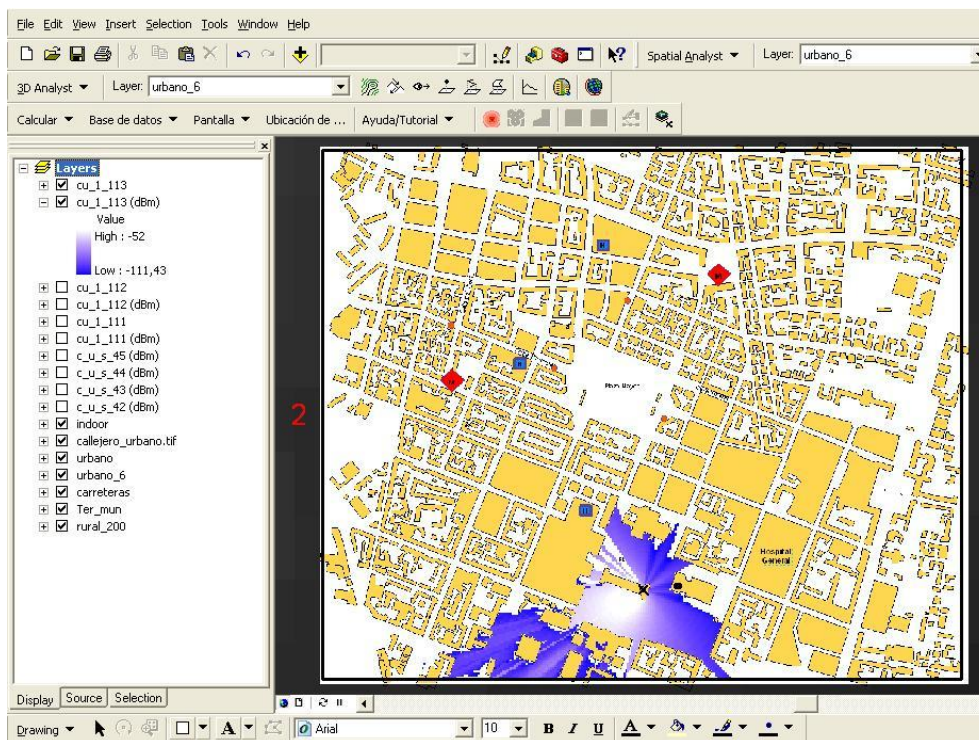
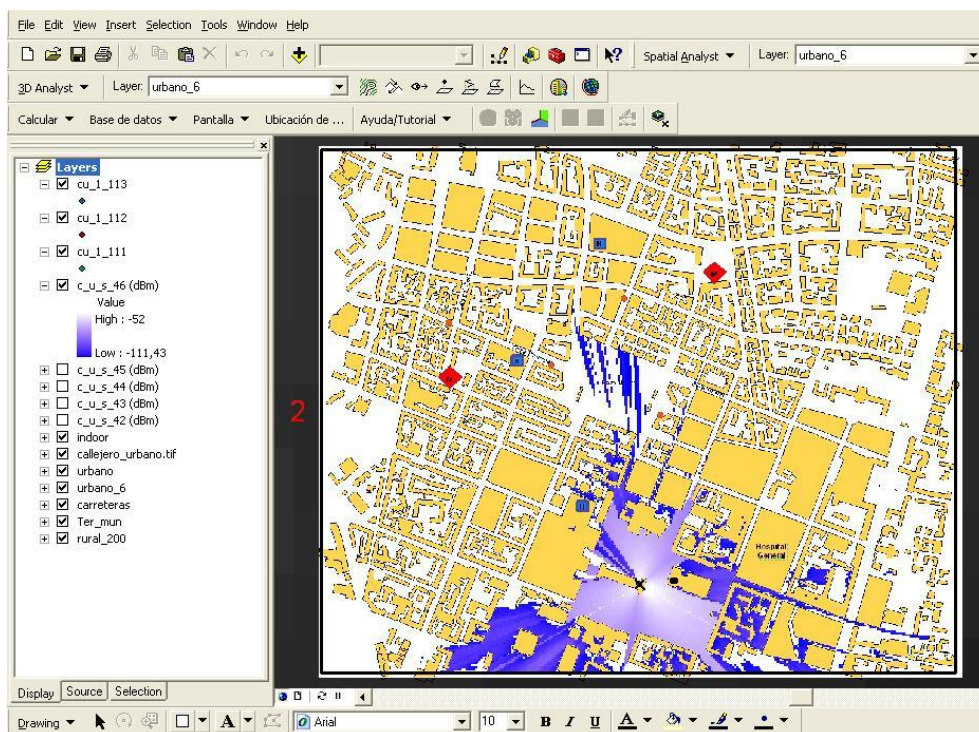


Figura 9.128. Cobertura de segundo sector (120°) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni



**Figura 9.129. Cobertura de tercer sector (240°) de quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

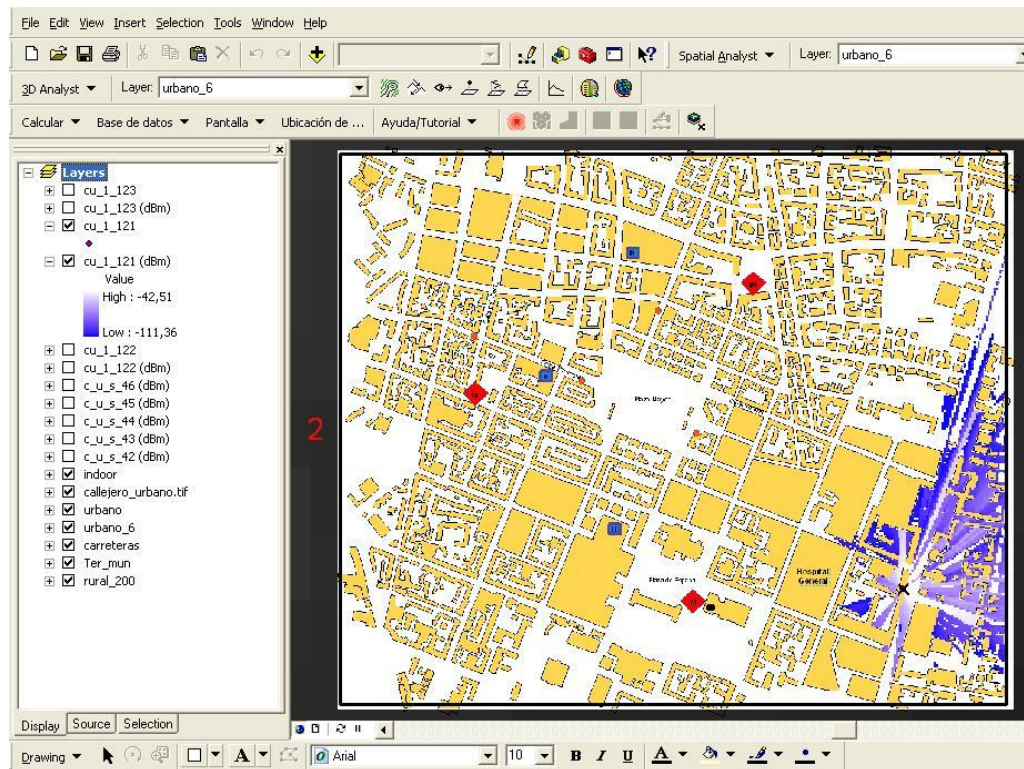


**Figura 9.130. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

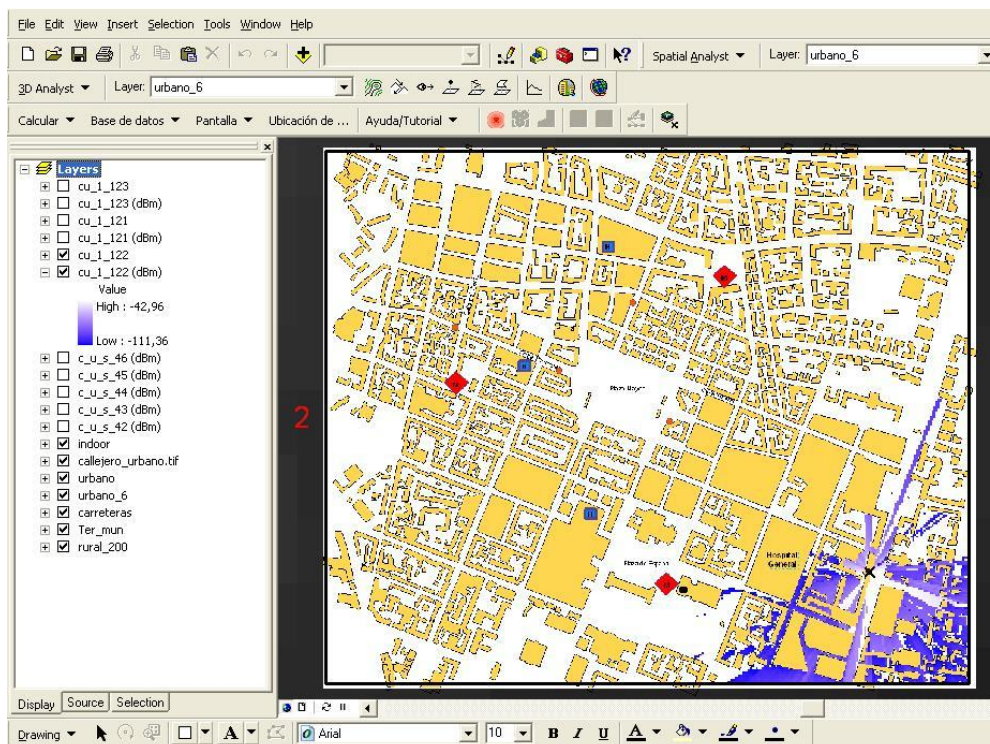


Los parámetros definidos para este emplazamiento son los mismos que los empleados con el análisis con el modelo COST-231. Si comparamos esta Figura 9.130 con la Figura 9.104 correspondiente a la obtenida con el modelo COST-231, podemos también confirmar lo que comentábamos anteriormente en cuanto a mayor alcance conseguido con ese primer método.

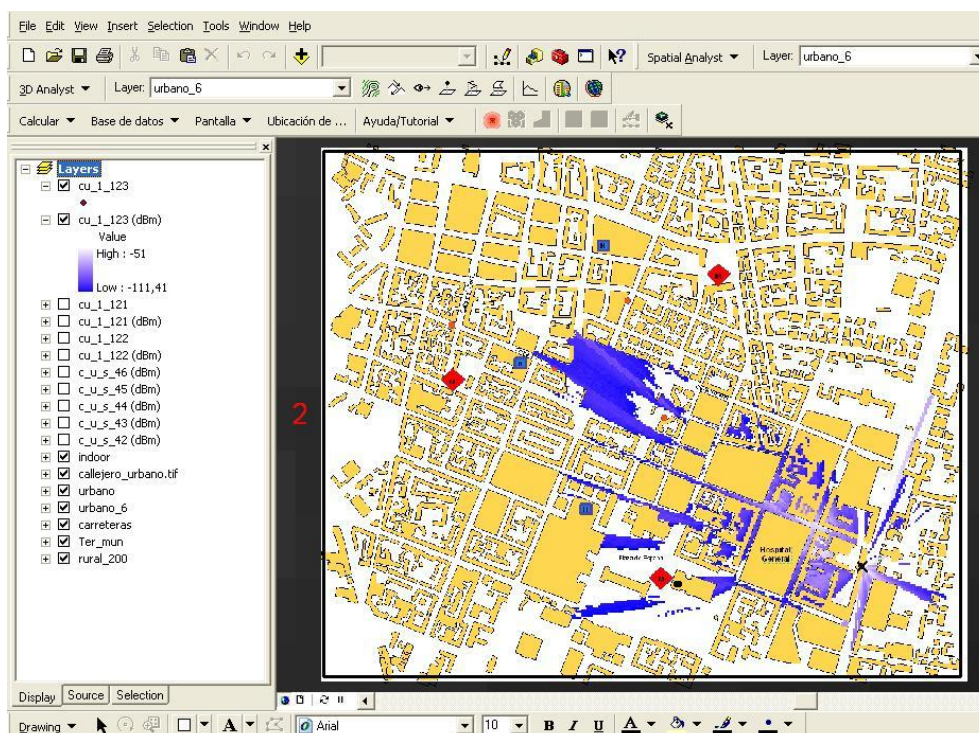
### Emplazamiento 6



**Figura 9.131. Cobertura de primer sector (70°) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

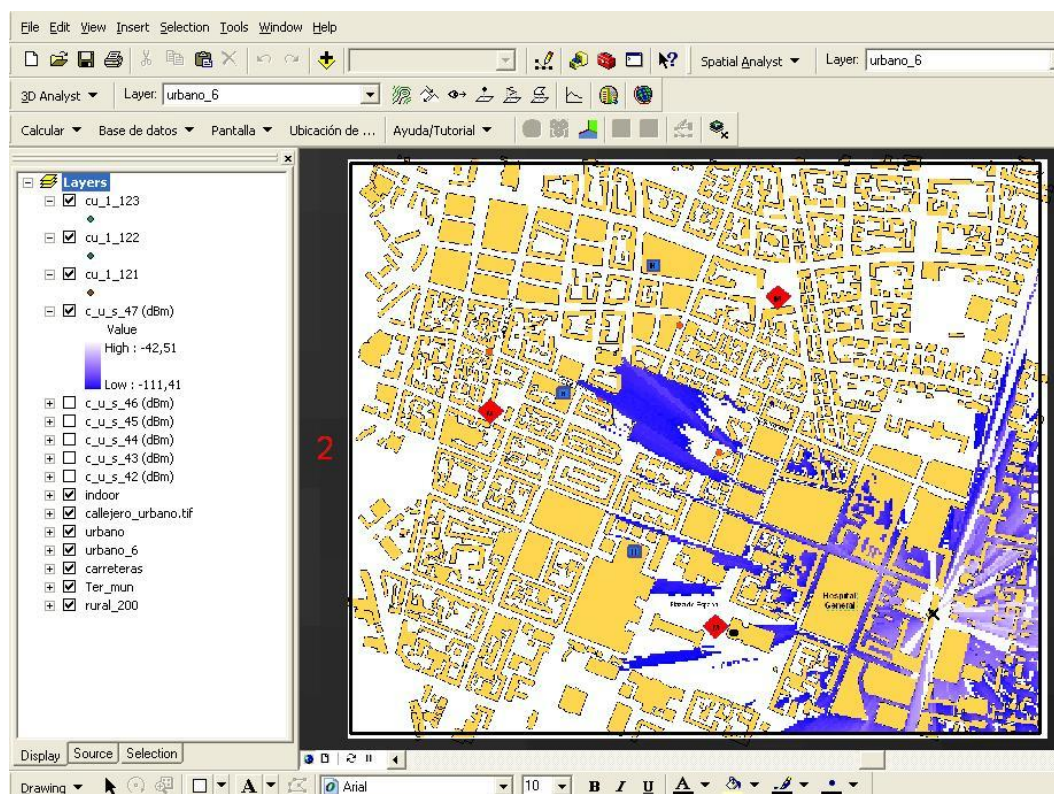


**Figura 9.132. Cobertura de segundo sector (190°) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

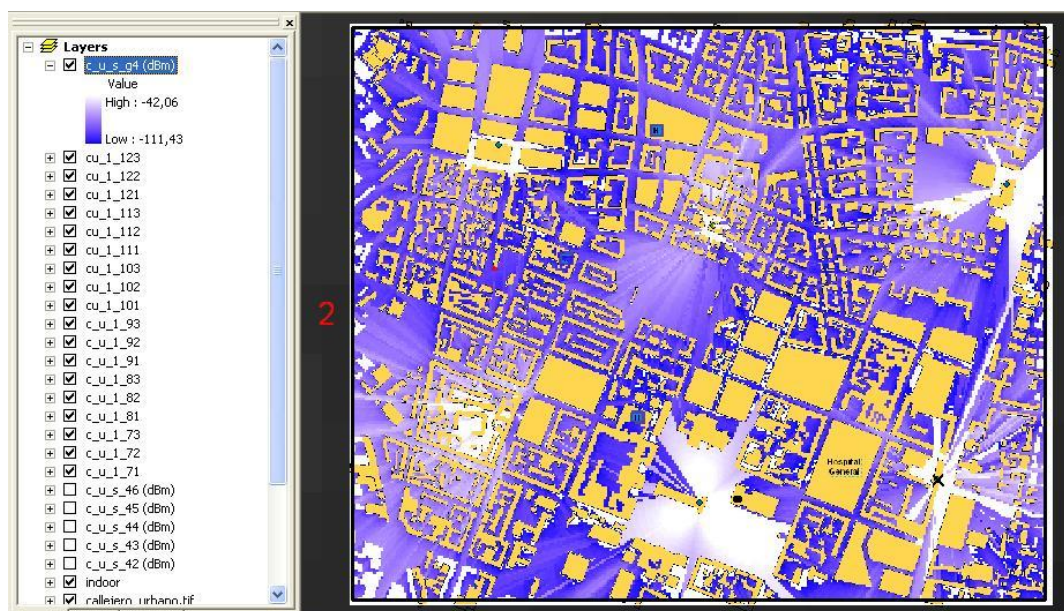


**Figura 9.133. Cobertura de tercer sector (310°) de sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



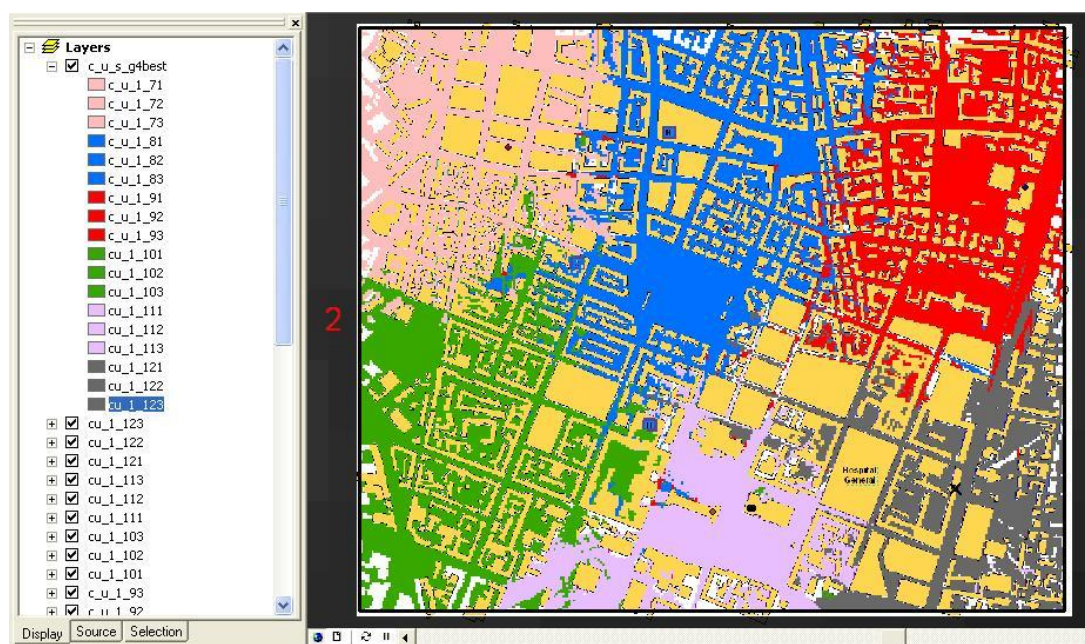


**Figura 9.134. Cobertura total proporcionada por sexto emplazamiento para caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



**Figura 9.135. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

El área urbana queda perfectamente suministrada del servicio de LTE tal y como se aprecia en la Figura 9.135. En la Figura 9.136 observamos las partes cubiertas por cada eNodo B a través del mapa de mejor servidor.



**Figura 9.136. Mapa de mejor servidor en el sistema correspondiente al caso 2 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

Aunque en la mayoría de los sectores hemos tenido bien que aumentar la PIRE o bien reducir el ángulo de elevación respecto a los datos configurados para el modelo COST-231, el resultado final que obtenemos es igual de completo que para el apartado anterior.

### 9.1.3. CASO 3 – 64-QAM, SIN MIMO, CQI = 13

Para este último caso tenemos la planificación con el menor número de eNodos B, 5. La localización de estos aparece en la Tabla 9.8.

COORDENADAS		
	X (m)	Y (m)
eNodo B 1	3690798	5338646
eNodo B 2	3691428	5338355
eNodo B 3	3692228	5338454
eNodo B 4	3691030	5337761
eNodo B 5	3691989	5337784

**Tabla 9.8. Coordenadas de la ubicación de los eNodos B para el caso 3**



### 9.1.3.1. UBICACIÓN BASADA EN USO DE MODELO DE PROPAGACIÓN COST-231

Tenemos una nueva tabla resumen con la configuración de las coberturas llevadas a cabo. Estos datos aparecen en la Tabla 9.9.

		Acimut ( $\theta$ )	Elev ( $\varphi$ )	H <sub>TX</sub> (m)	PIRE (dBm)	G <sub>r</sub> (dB)	L <sub>r</sub> (dB)	S (dBm)
<b>eNodo B 1</b>	<b>Sector 1</b>	0°	15°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	25°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	18°	30	10	17	3	-111,435
<b>eNodo B 2</b>	<b>Sector 1</b>	0°	15°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	20°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	20°	30	10	17	3	-111,435
<b>eNodo B 3</b>	<b>Sector 1</b>	0°	18°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	18°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	20°	30	10	17	3	-111,435
<b>eNodo B 4</b>	<b>Sector 1</b>	0°	18°	30	8	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	120°	18°	30	8	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	240°	15°	30	10	17	3	-111,435
<b>eNodo B 5</b>	<b>Sector 1</b>	80°	18°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 2</b>	200°	15°	30	10	17	3	-111,435
	<b>Sector 3</b>	320°	18°	30	8	17	3	-111,435

**Tabla 9.9. Configuración para cada sector del caso 3 en RadioGIS, usando el modelo COST-231**

Observamos seguidamente las coberturas obtenidas para los 5 eNodos B de este caso, dadas de la Figura 9.137 a la 9.158.

Emplazamiento 1

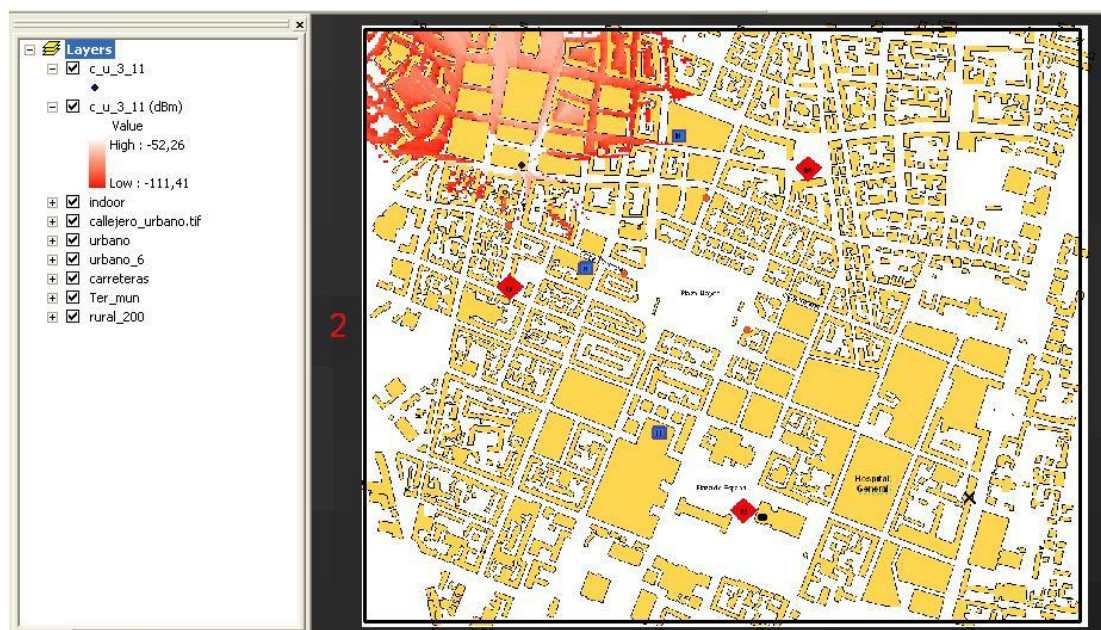


Figura 9.137. Cobertura de primer sector ( $0^\circ$ ) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231

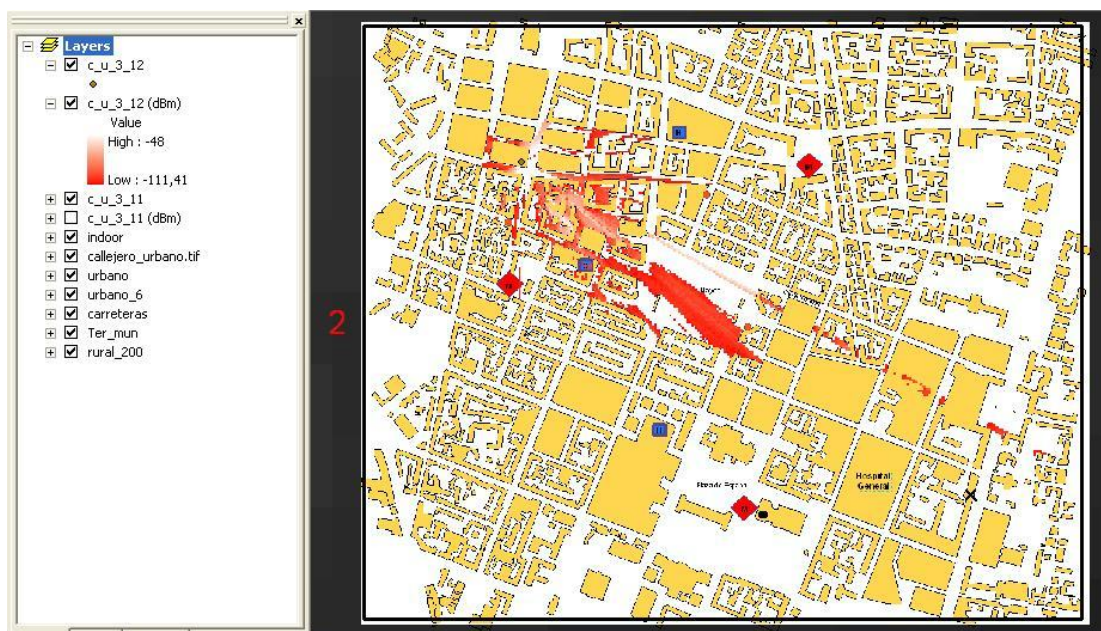
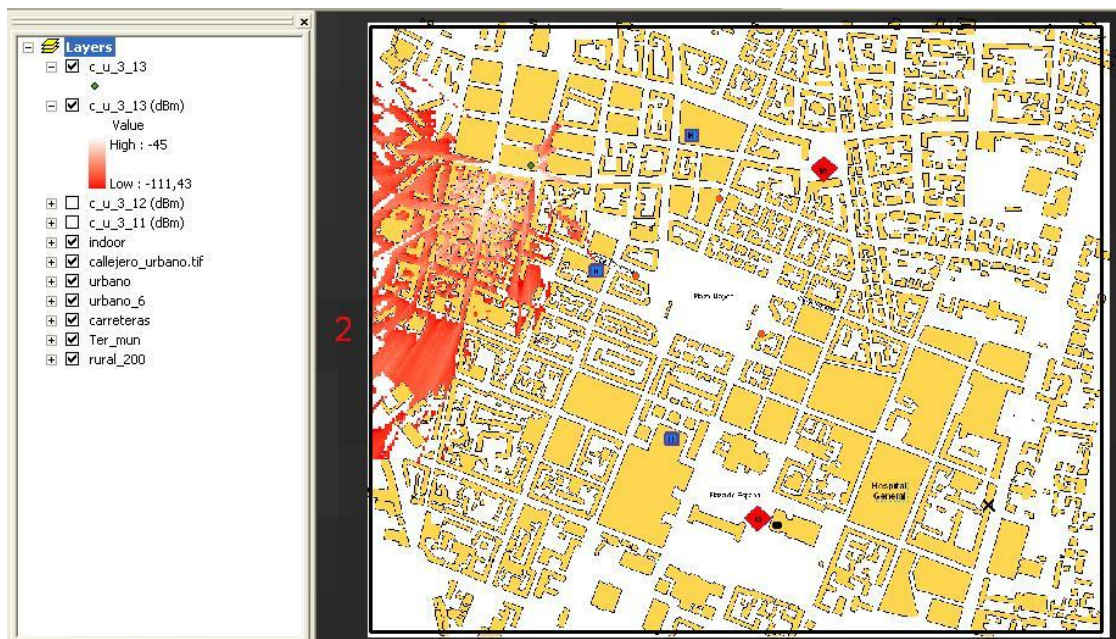


Figura 9.138. Cobertura de segundo sector ( $120^\circ$ ) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231





**Figura 9.139. Cobertura de tercer sector (240°) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.140. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 2

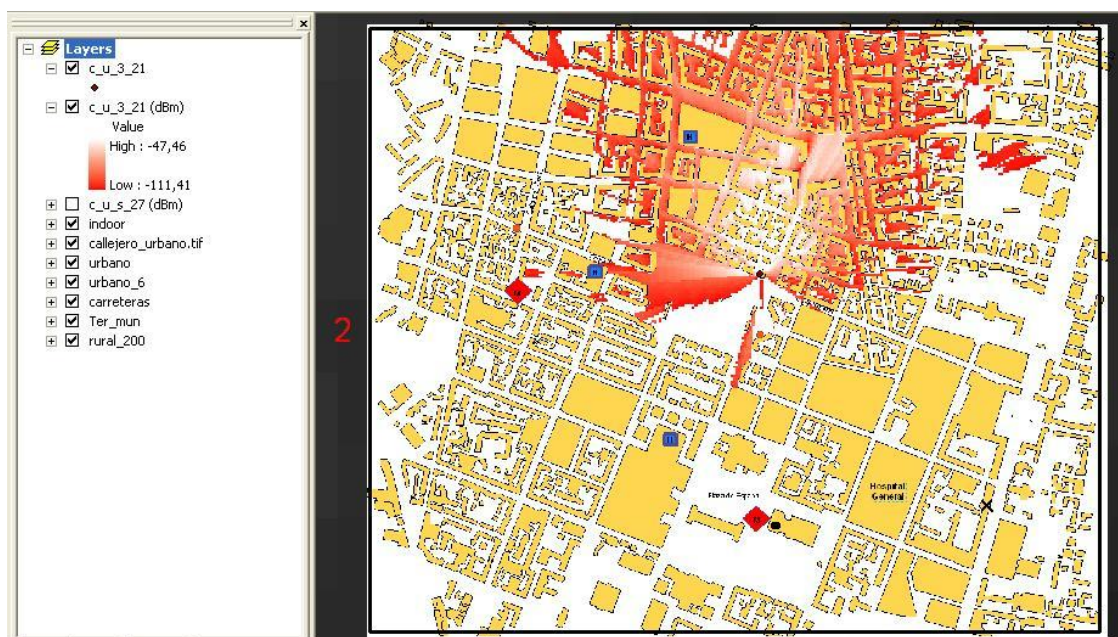


Figura 9.141. Cobertura de primer sector ( $0^\circ$ ) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231

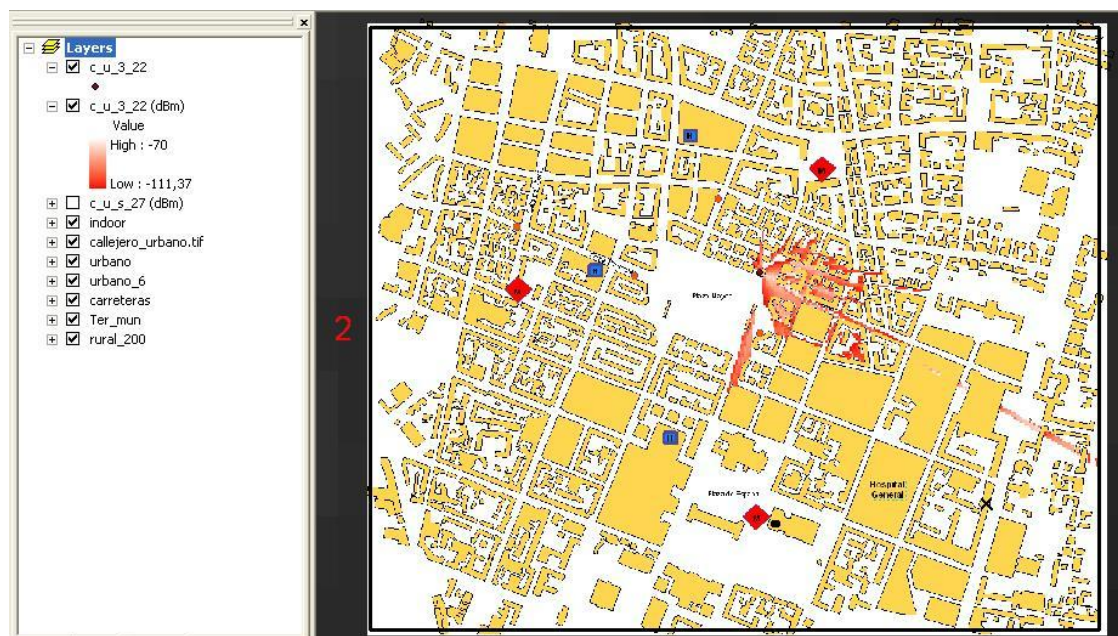
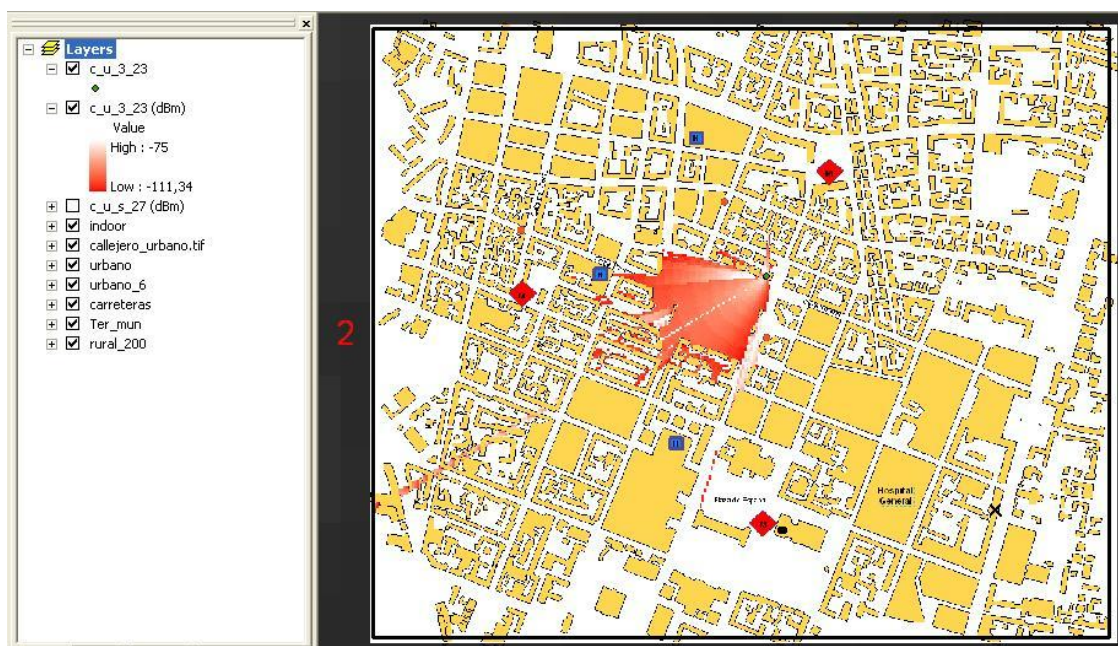
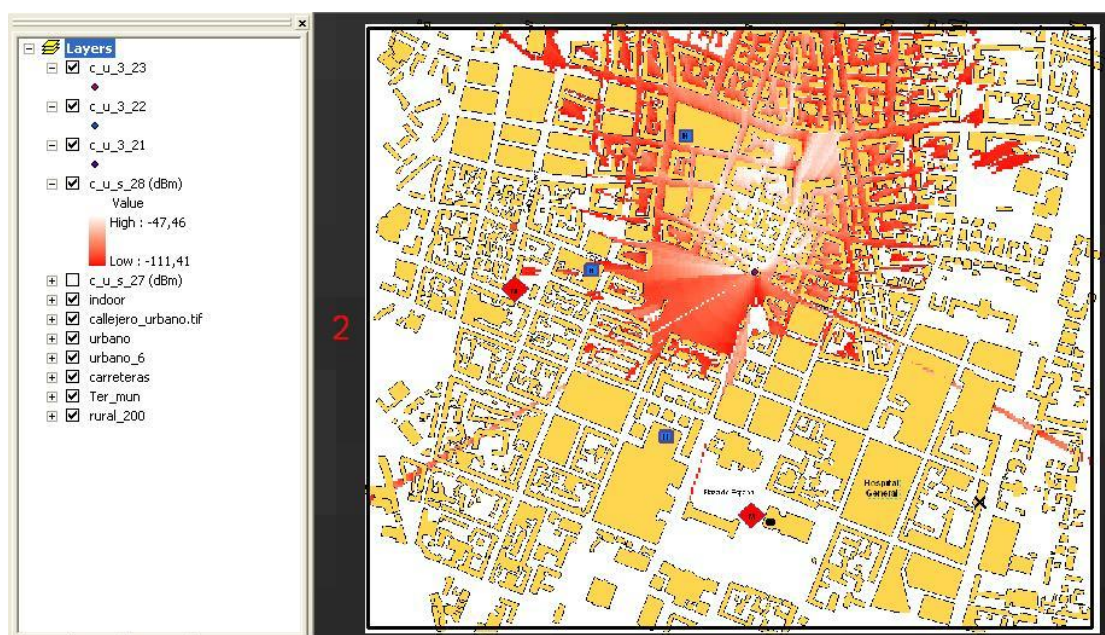


Figura 9.142. Cobertura de segundo sector ( $120^\circ$ ) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231





**Figura 9.143. Cobertura de tercer sector (240°) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.144. Cobertura total proporcionada por segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 3

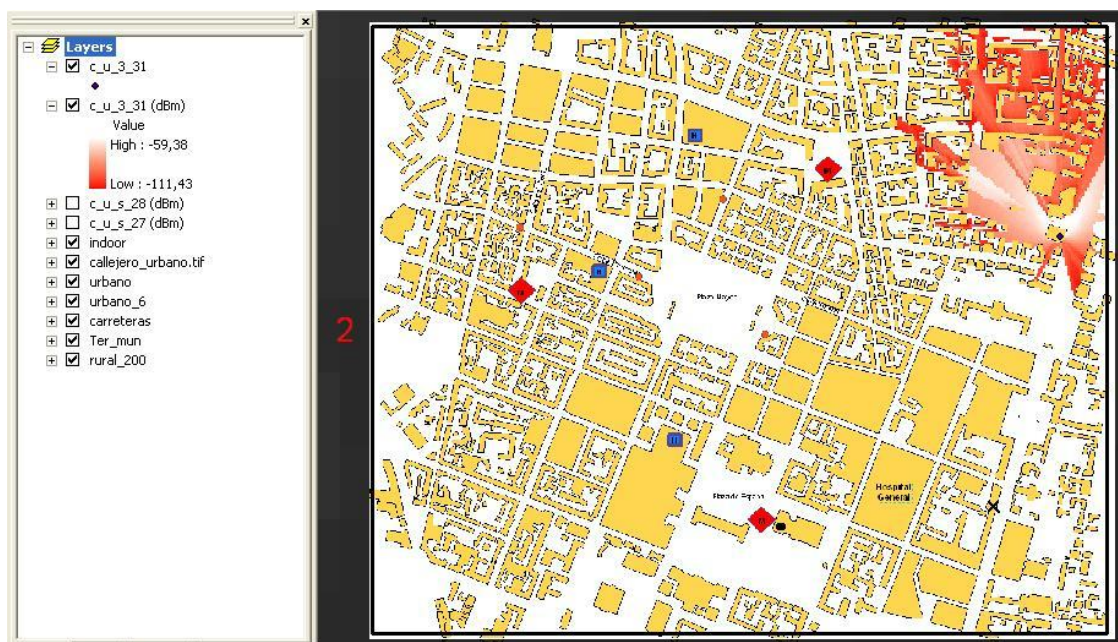


Figura 9.145. Cobertura de primer sector ( $0^\circ$ ) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231

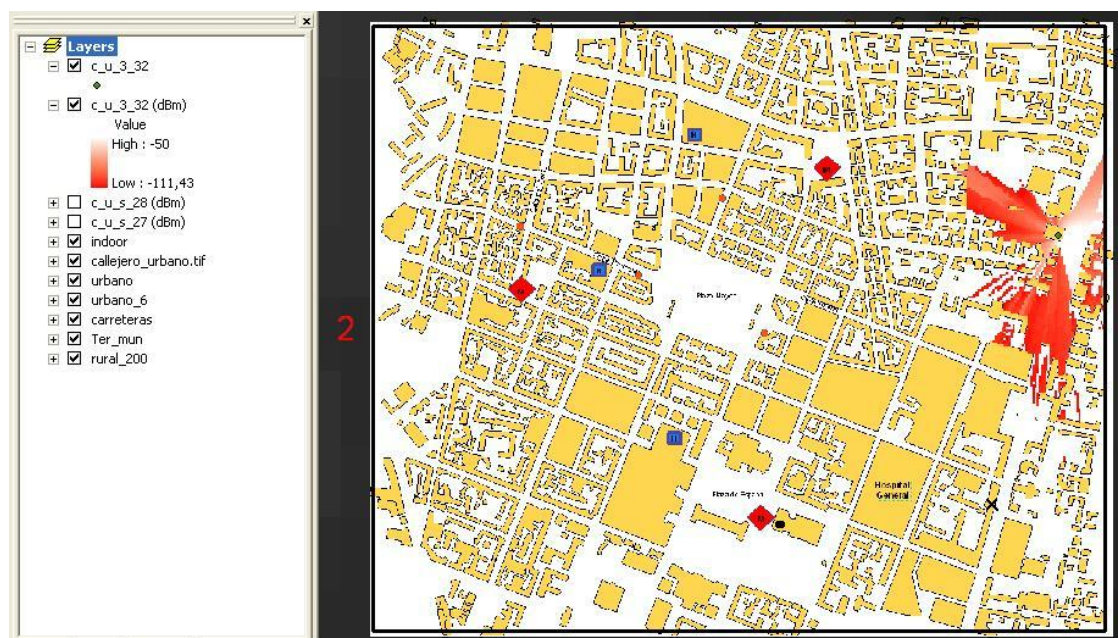
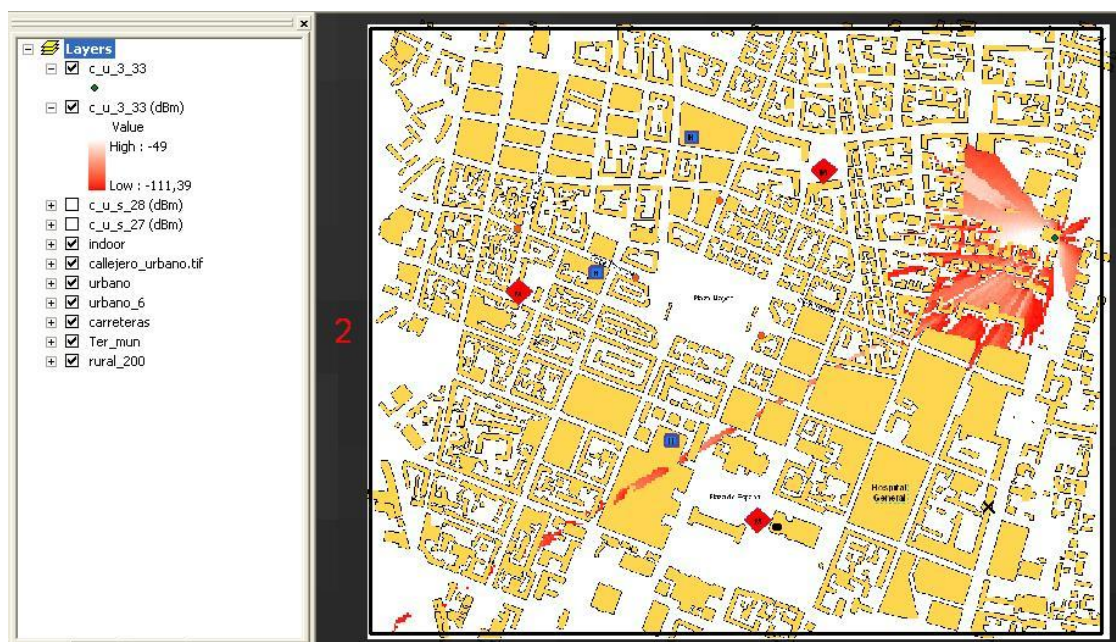
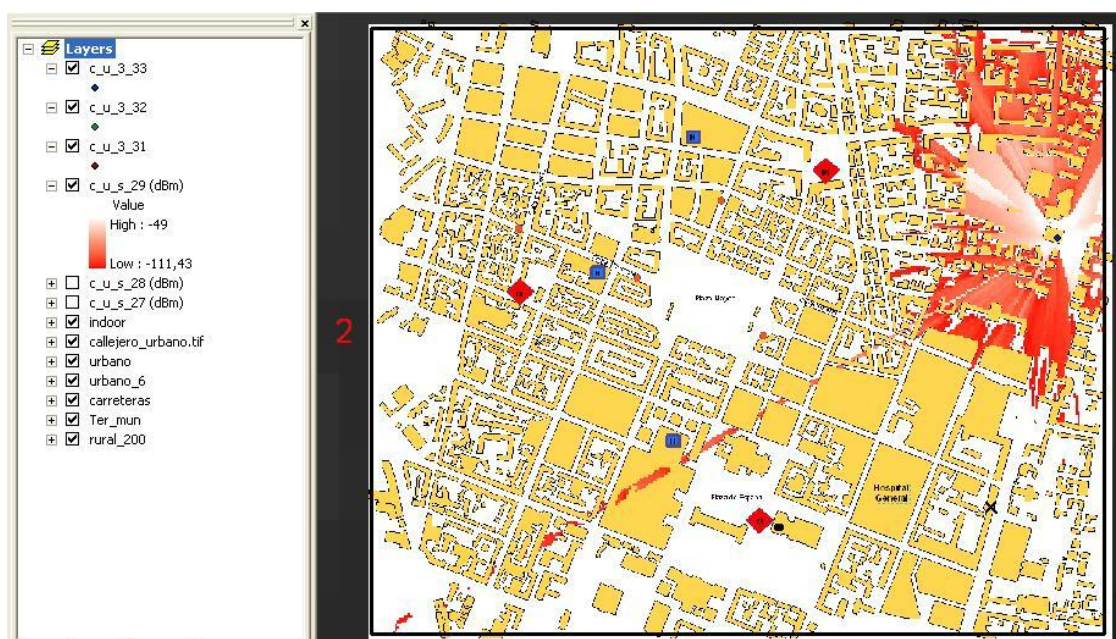


Figura 9.146. Cobertura de segundo sector ( $120^\circ$ ) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231





**Figura 9.147. Cobertura de tercer sector (240°) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.148. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 4

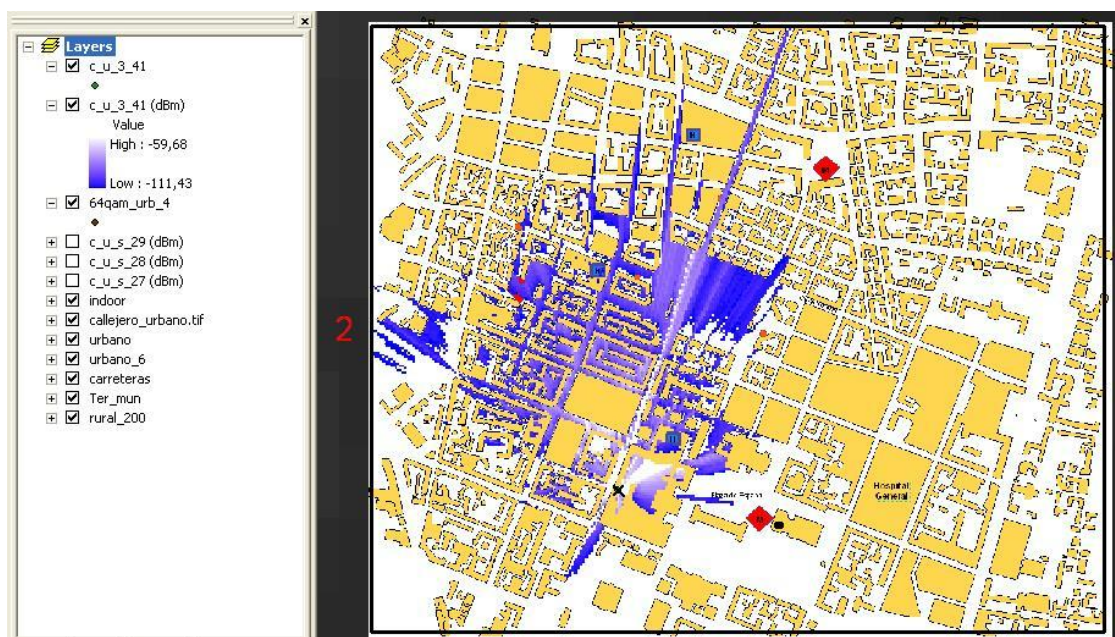


Figura 9.149. Cobertura de primer sector (0°) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231

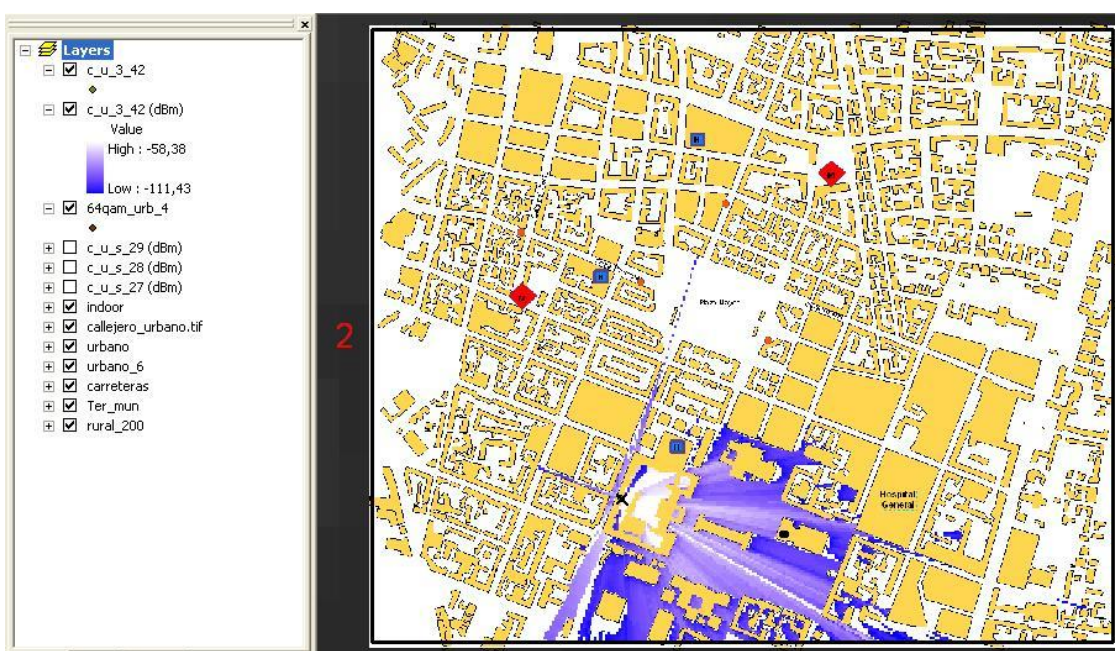
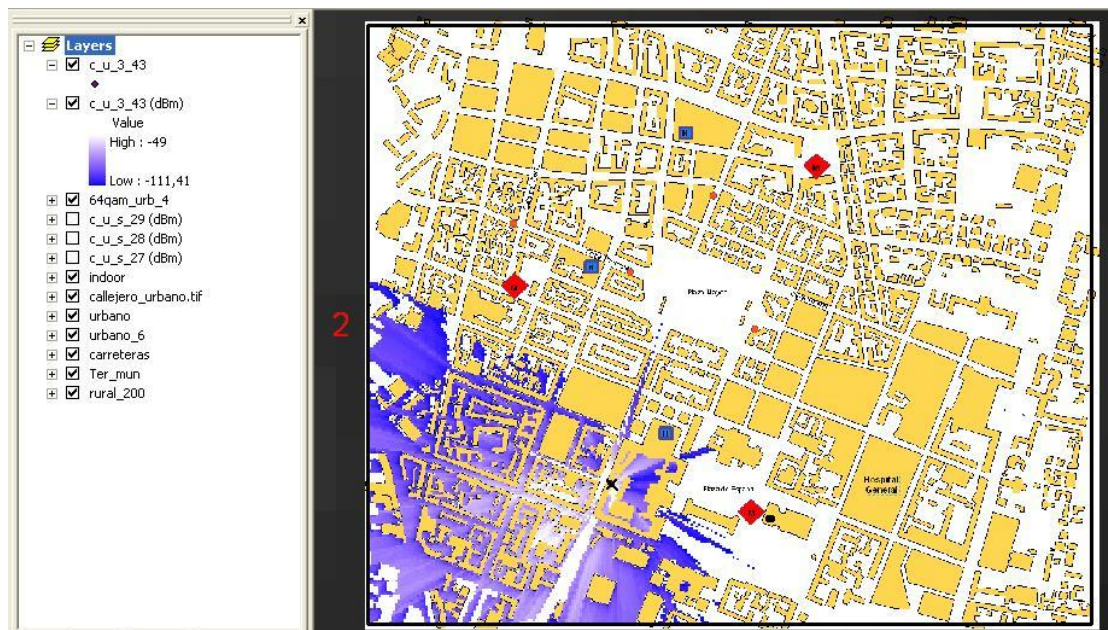
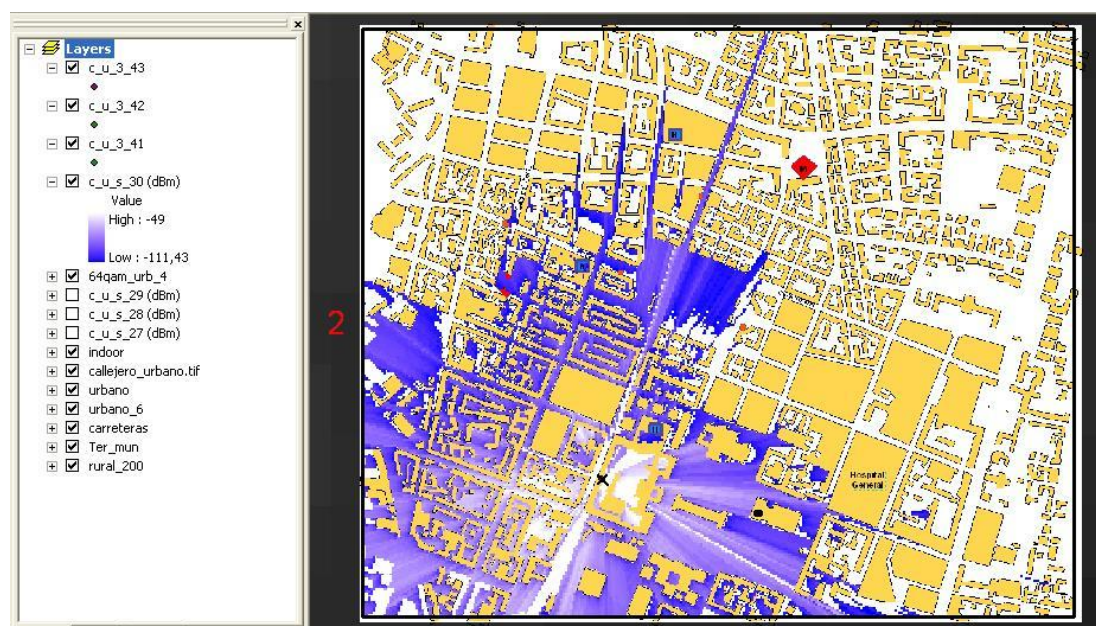


Figura 9.150. Cobertura de segundo sector (120°) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231





**Figura 9.151. Cobertura de tercer sector (240°) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.152. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231**



Emplazamiento 5



Figura 9.153. Cobertura de primer sector (0°) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231

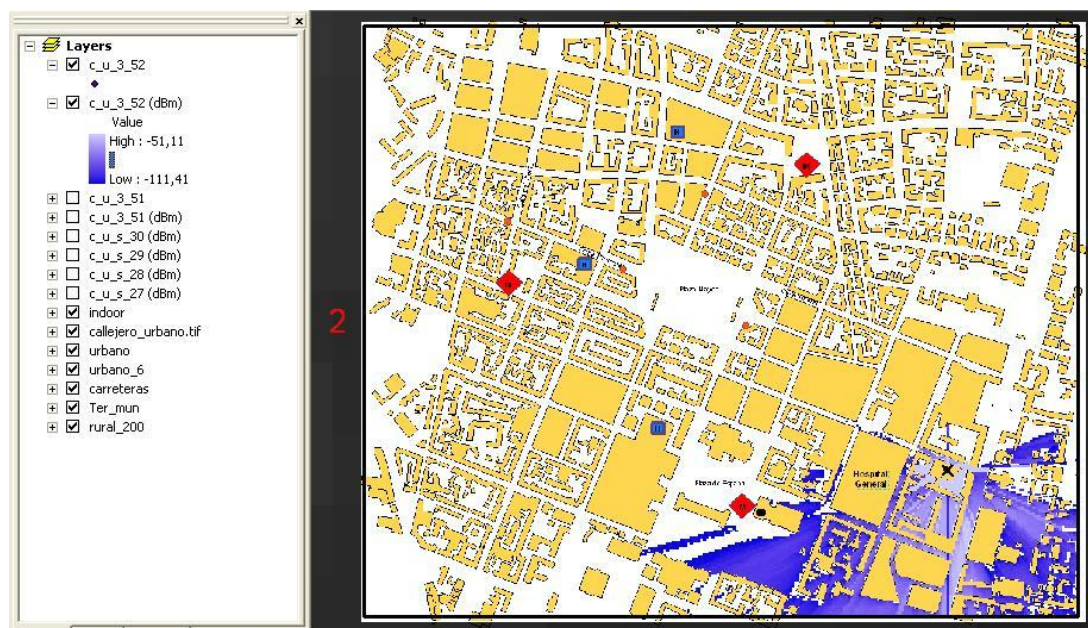
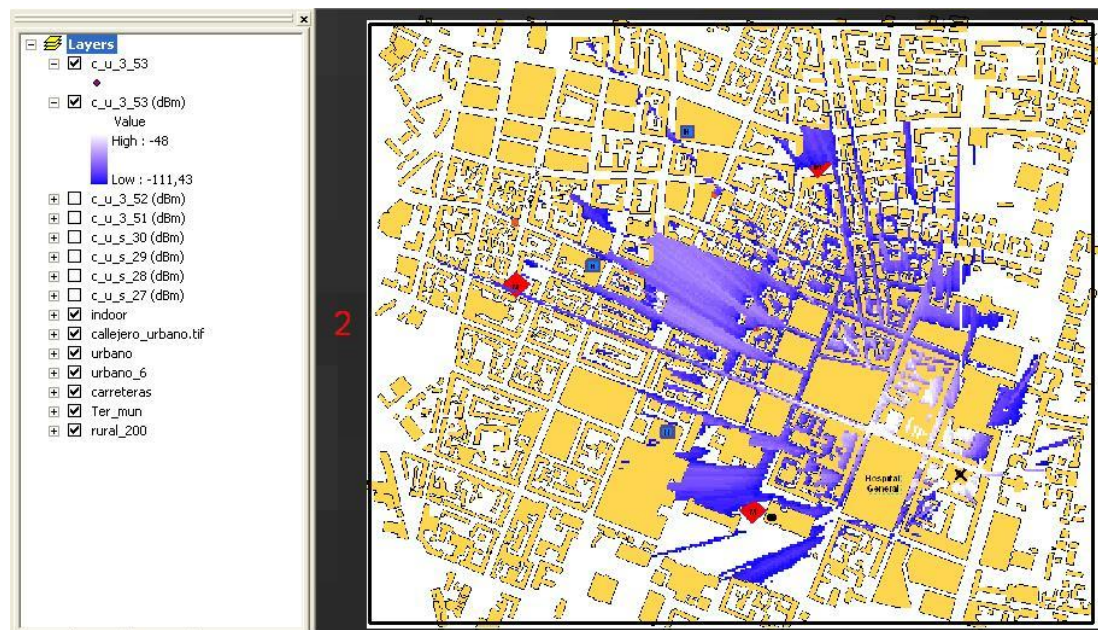
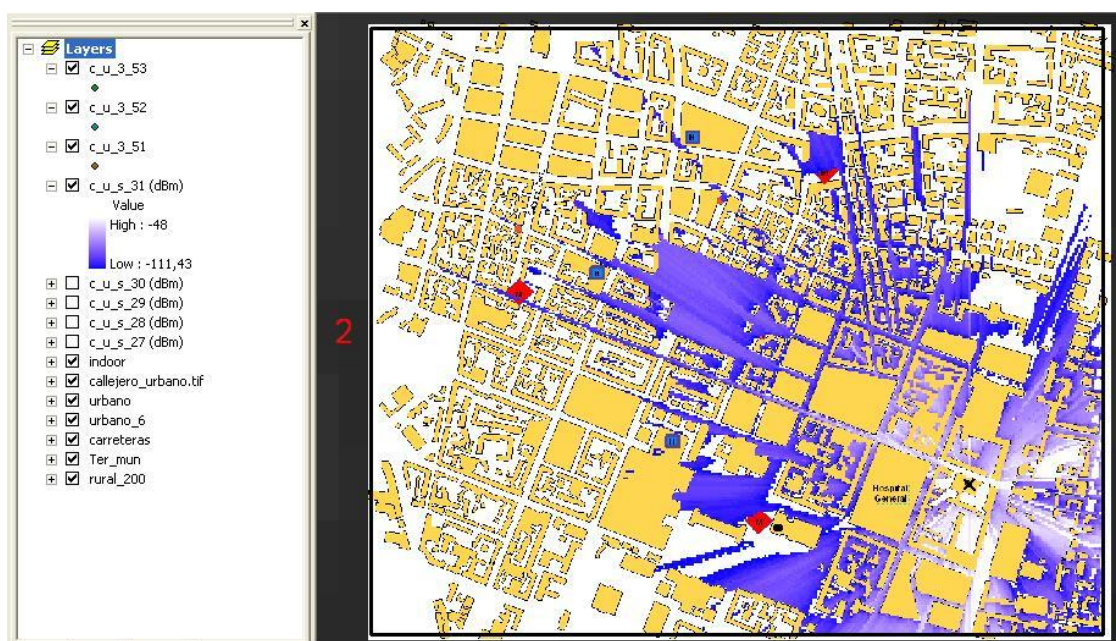


Figura 9.154. Cobertura de segundo sector (120°) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231





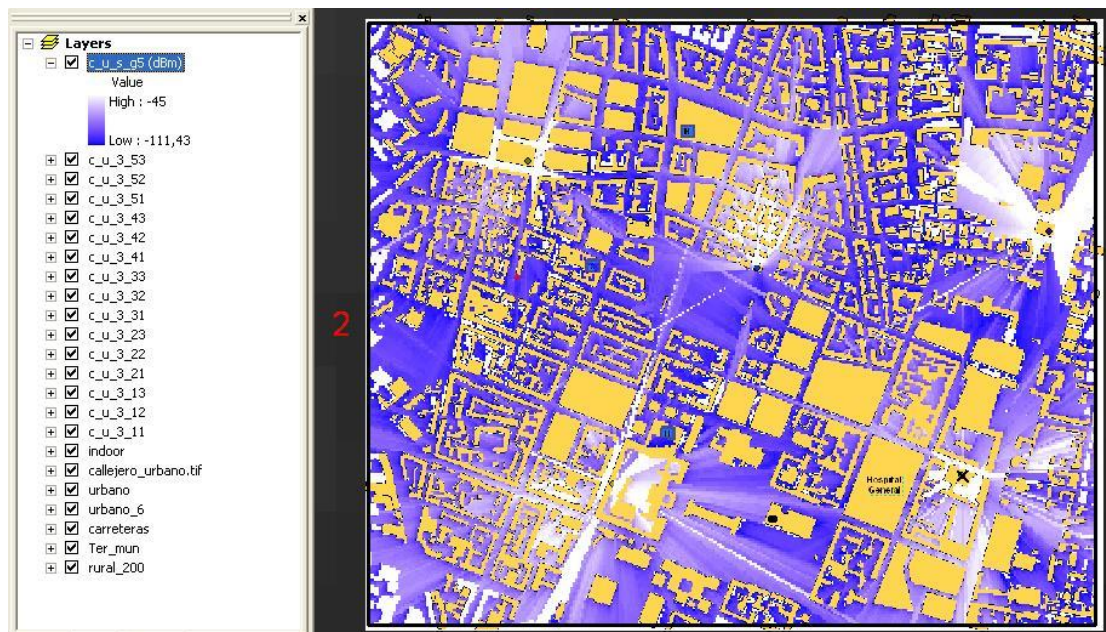
**Figura 9.155. Cobertura de tercer sector (240°) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231**



**Figura 9.156. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con COST-231**

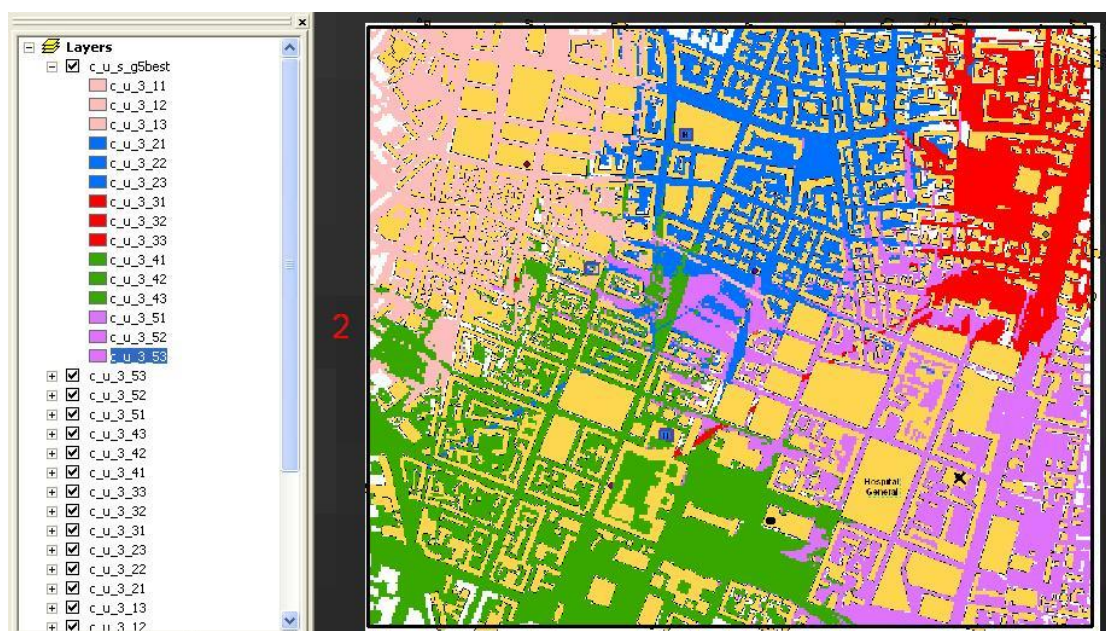
En la Figura 9.157 tenemos la cobertura dada por el sistema de los 5 eNodos B.





**Figura 9.157. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 3 en entorno urbano, con COST-231**

La zona de servicio queda también cubierta plenamente en este caso. En la Figura 9.158 tenemos el mapa de mejor servidor.



**Figura 9.158. Mapa de mejor servidor en el sistema correspondiente al caso 3 en entorno urbano, con COST-231**

Aparecen perfectamente diferenciadas las coberturas proporcionadas por cada uno de los 5 eNodos B.



### 9.1.3.2. UBICACIÓN BASADA EN USO DE MODELO DE PROPAGACIÓN HAR-XIA-BERTONI

En la Tabla 9.10 tenemos la última tabla resumen para el entorno urbano.

		Acimut ( $\theta$ )	Elev ( $\varphi$ )	H <sub>TX</sub> (m)	PIRE (dBm)	G <sub>r</sub> (dB)	L <sub>r</sub> (dB)	S (dBm)
eNodo B 1	Sector 1	0°	10°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	18°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	15°	30	10	17	3	-111,435
eNodo B 2	Sector 1	0°	10°	30	15	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	18°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	18°	30	10	17	3	-111,435
eNodo B 3	Sector 1	0°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	15°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	18°	30	10	17	3	-111,435
eNodo B 4	Sector 1	0°	17°	30	8	17	3	-111,435
	Sector 2	120°	15°	30	8	17	3	-111,435
	Sector 3	240°	0°	30	10	17	3	-111,435
eNodo B 5	Sector 1	80°	0°	30	10	17	3	-111,435
	Sector 2	200°	10°	30	15	17	3	-111,435
	Sector 3	320°	17°	30	12	17	3	-111,435

**Tabla 9.10. Configuración para cada sector del caso 3 en RadioGIS, usando el modelo Har-Xia-Bertoni**

Observamos seguidamente las coberturas obtenidas para los 5 eNodos B de este caso, dadas de la Figura 9.159 a la 9.180.

Emplazamiento 1

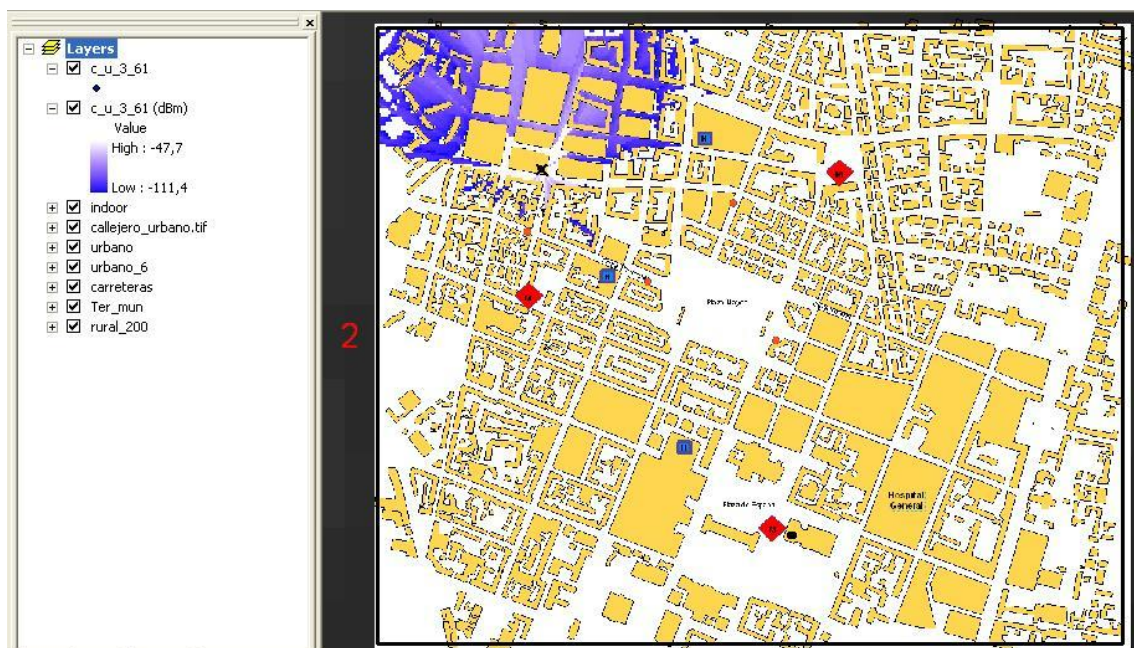


Figura 9.159. Cobertura de primer sector ( $0^\circ$ ) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

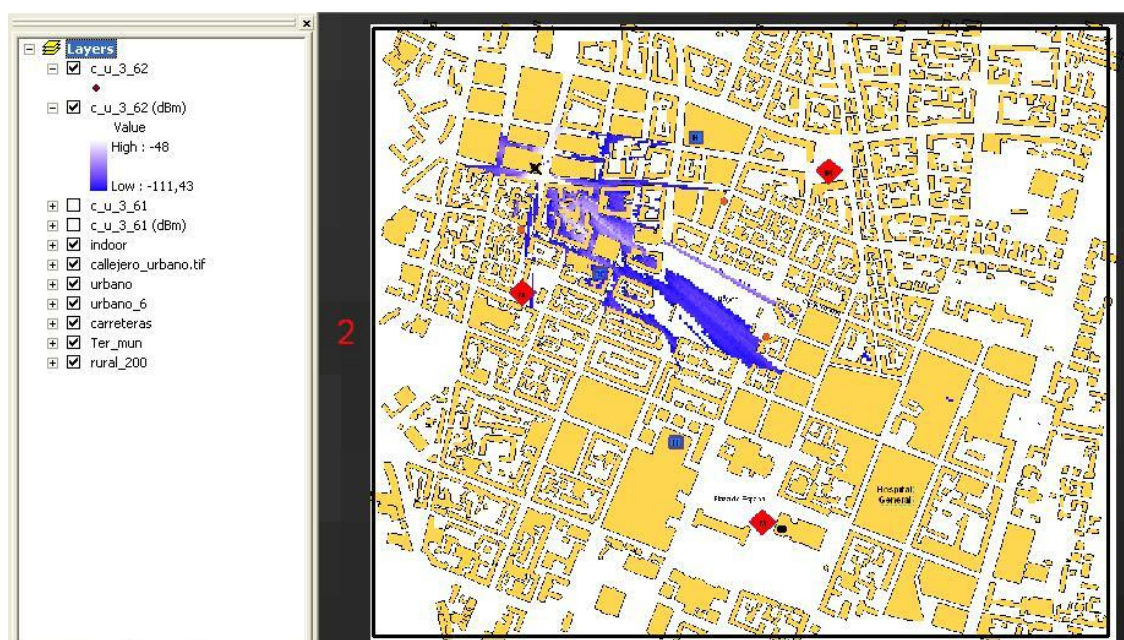


Figura 9.160. Cobertura de segundo sector ( $120^\circ$ ) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni



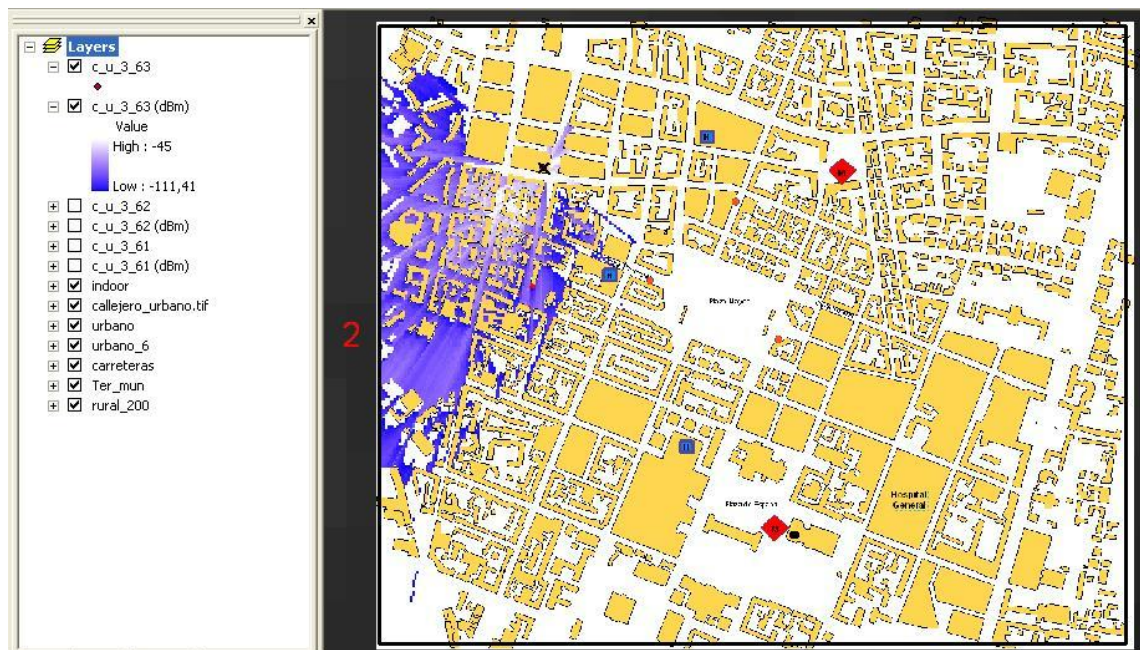


Figura 9.161. Cobertura de tercer sector (240°) de primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

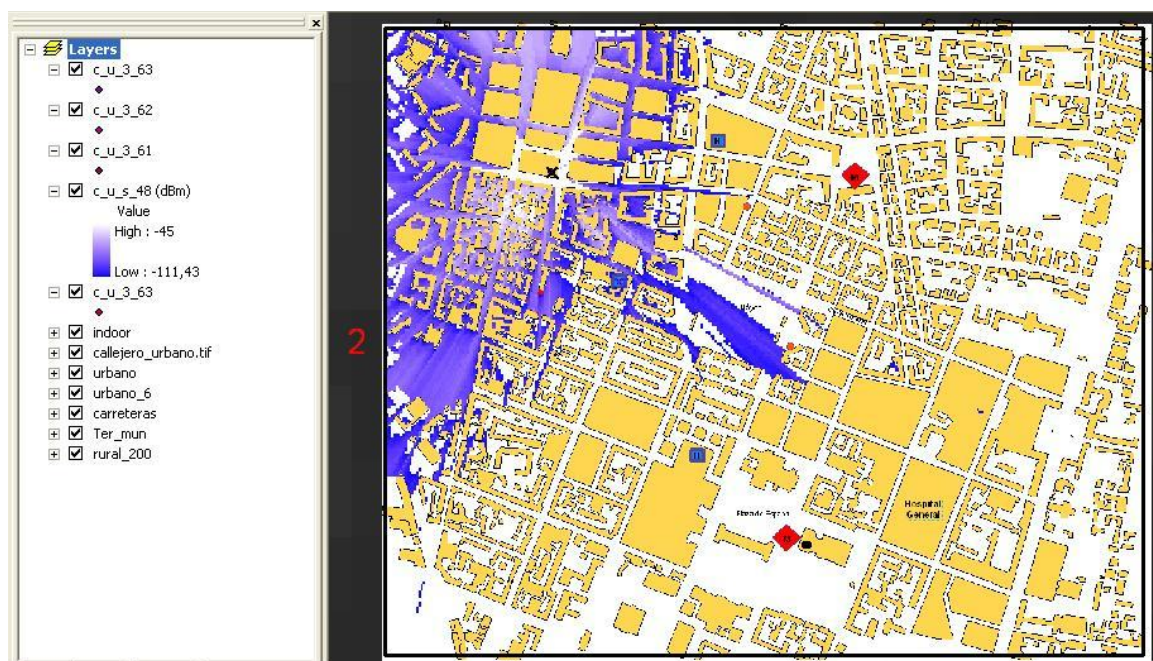


Figura 9.162. Cobertura total proporcionada por primer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni



Emplazamiento 2

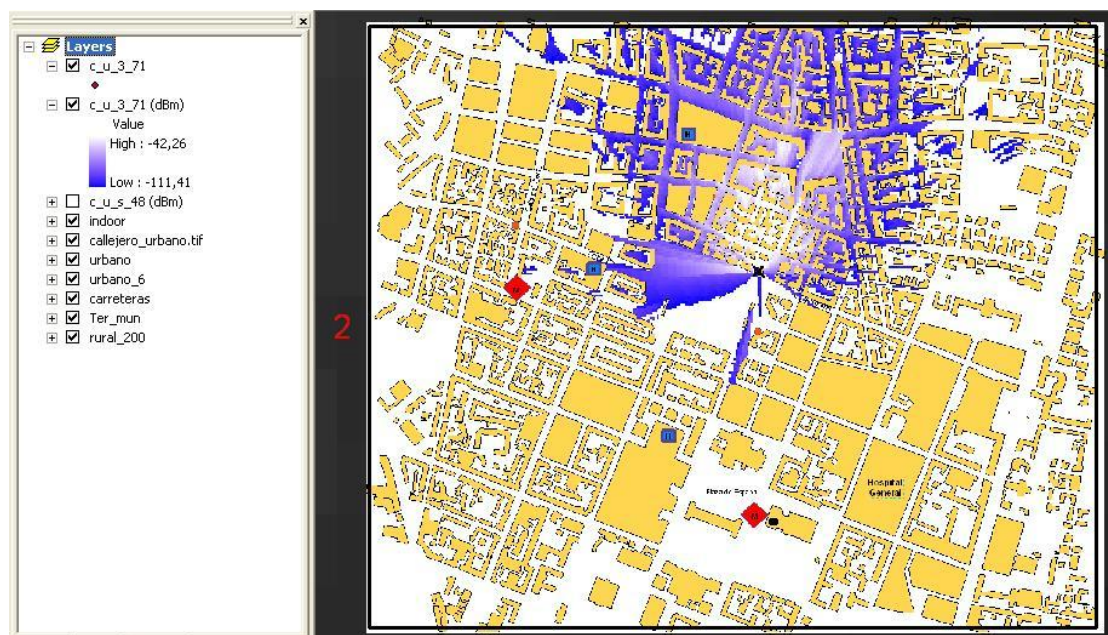


Figura 9.163. Cobertura de primer sector (0°) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

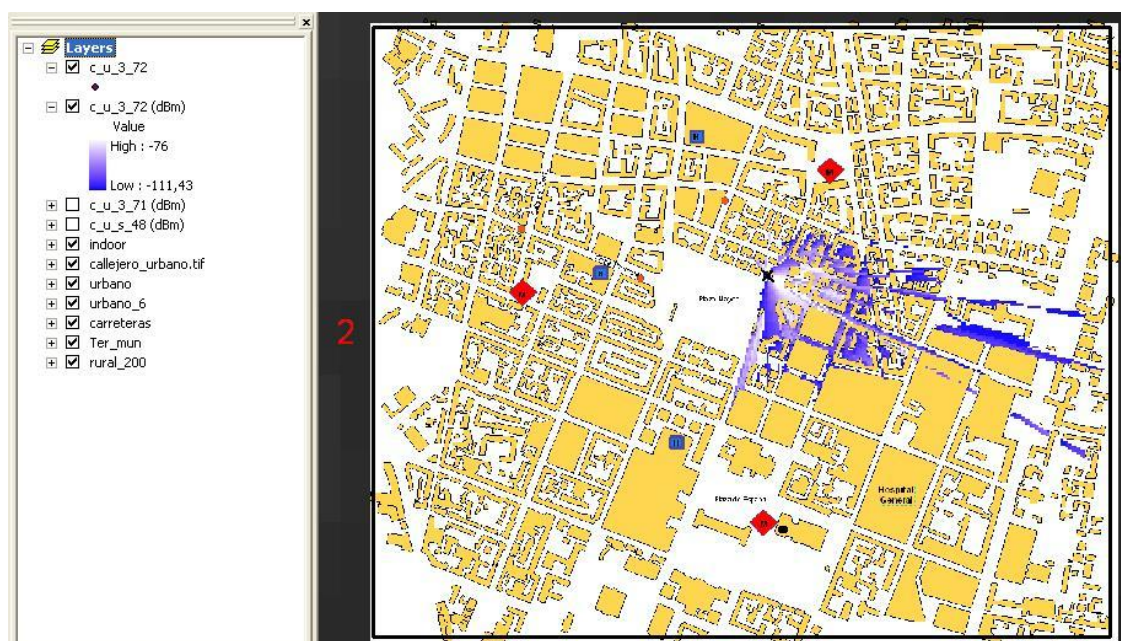


Figura 9.164. Cobertura de segundo sector (120°) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni



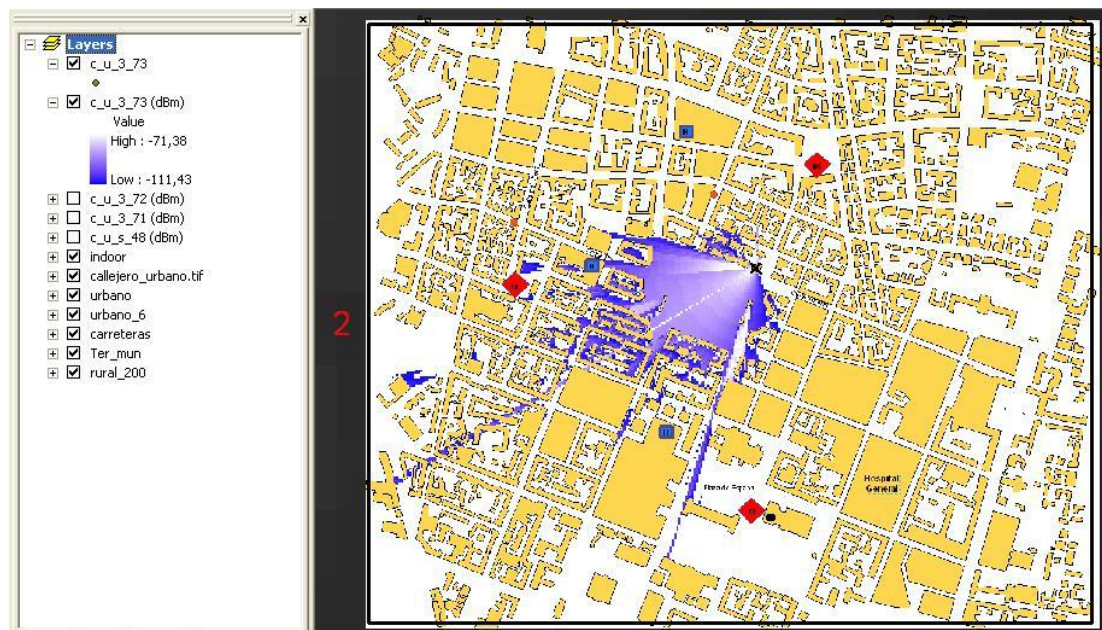


Figura 9.165. Cobertura de tercer sector (240°) de segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

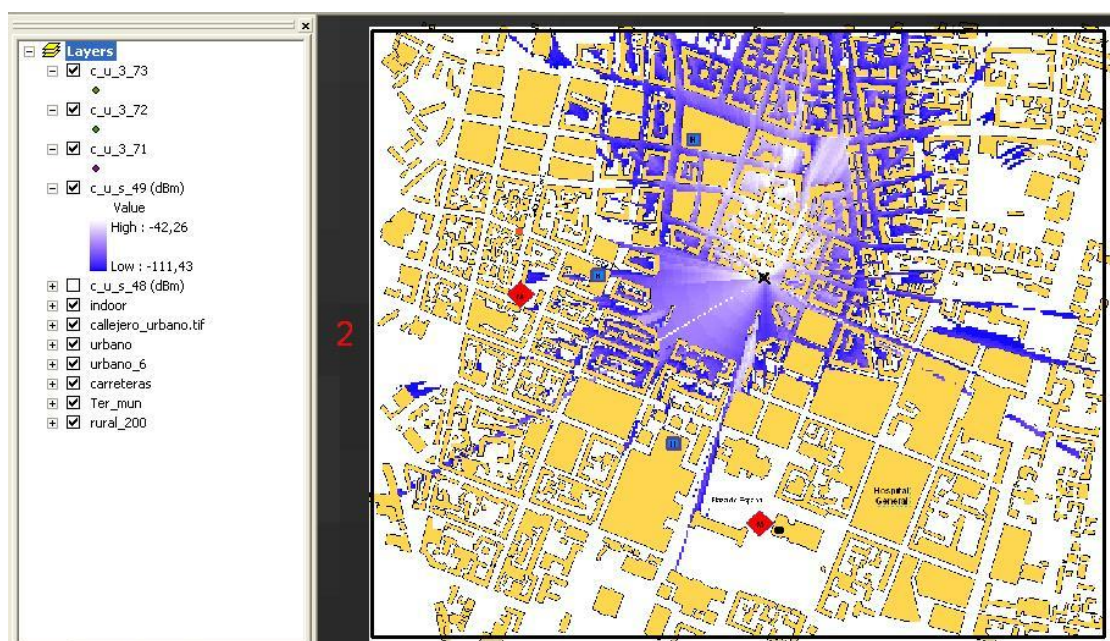


Figura 9.166. Cobertura total proporcionada por segundo emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni



Emplazamiento 3

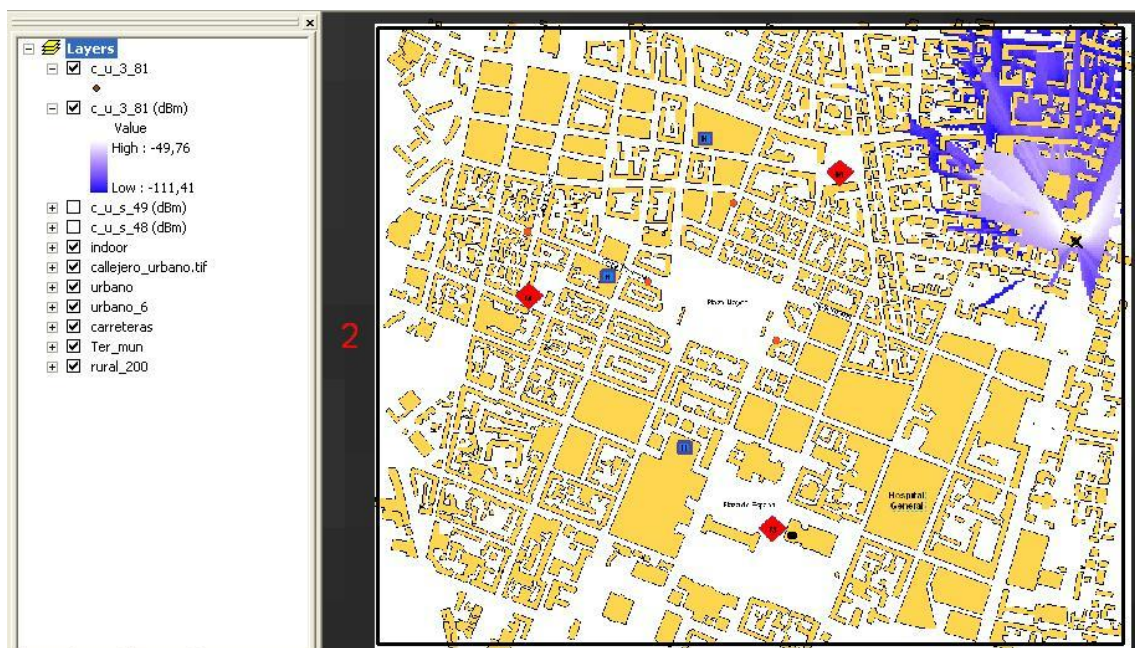


Figura 9.167. Cobertura de primer sector (0°) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

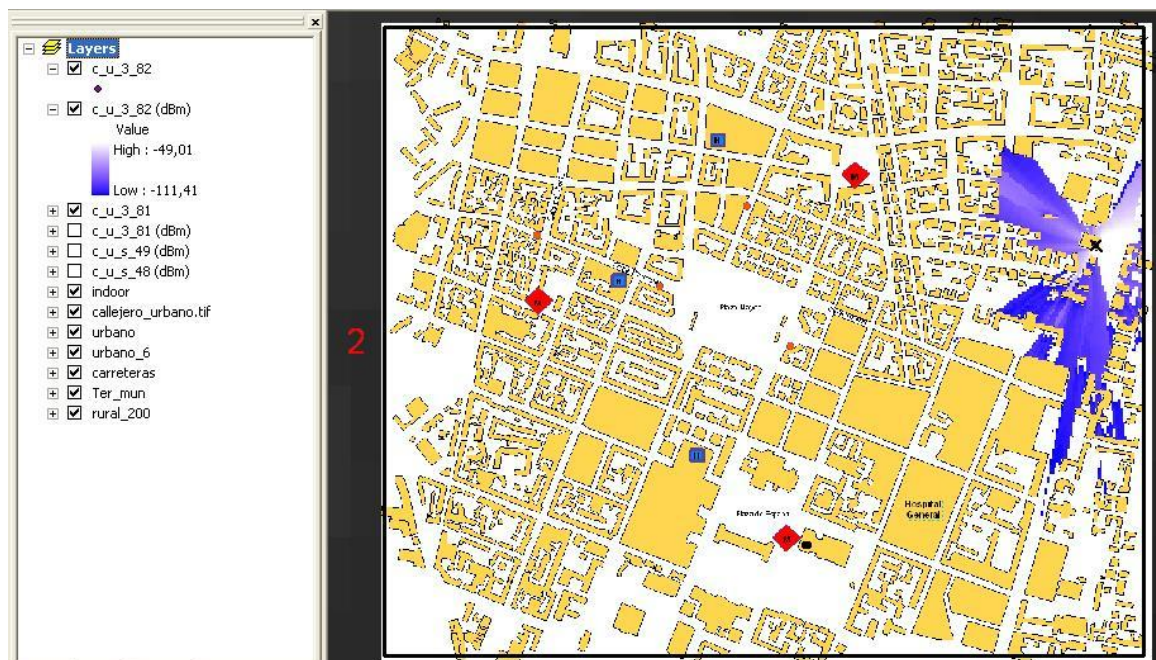


Figura 9.168. Cobertura de segundo sector (120°) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni



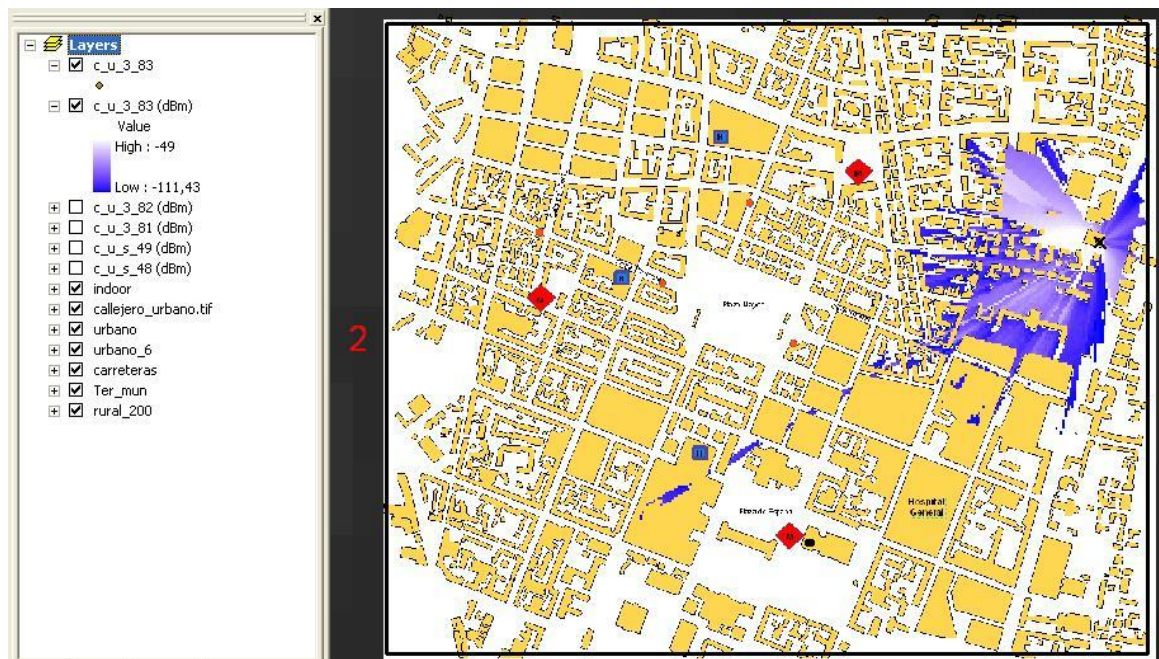


Figura 9.169. Cobertura de tercer sector (240°) de tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

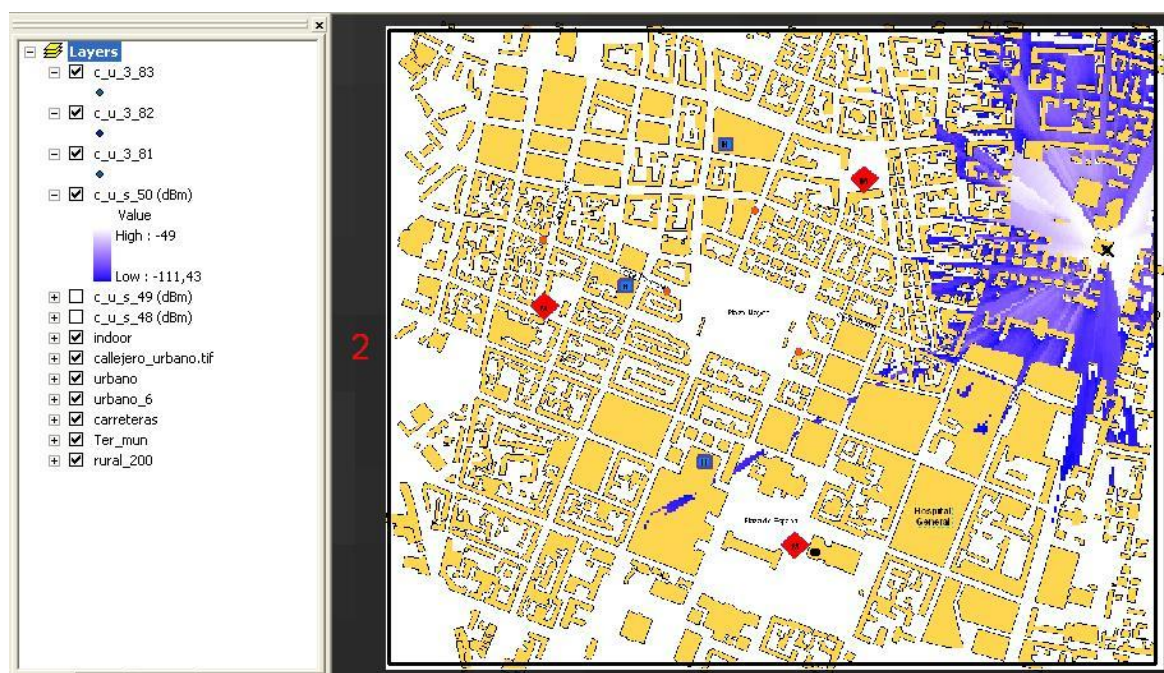


Figura 9.170. Cobertura total proporcionada por tercer emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni



Emplazamiento 4

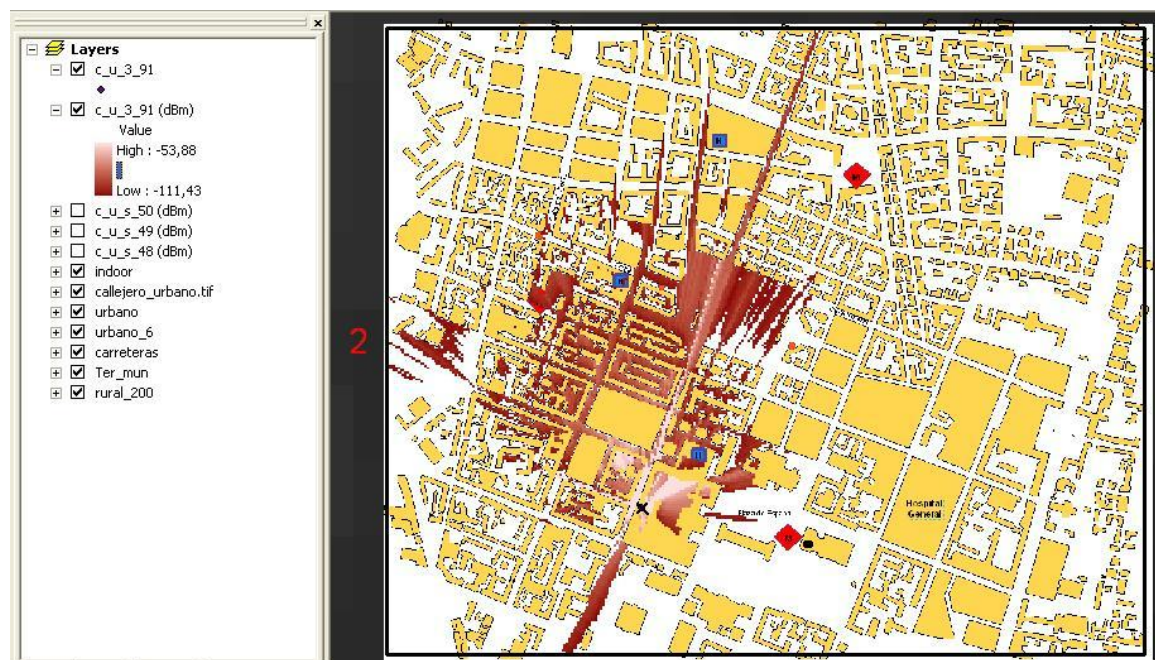


Figura 9.171. Cobertura de primer sector (0°) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

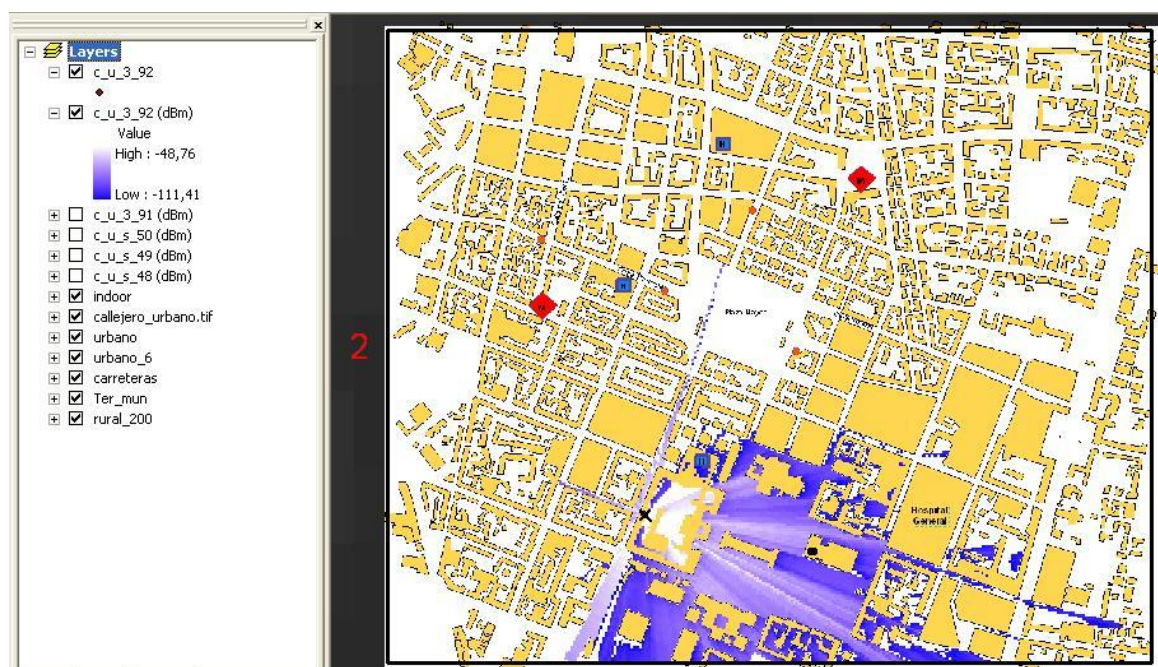
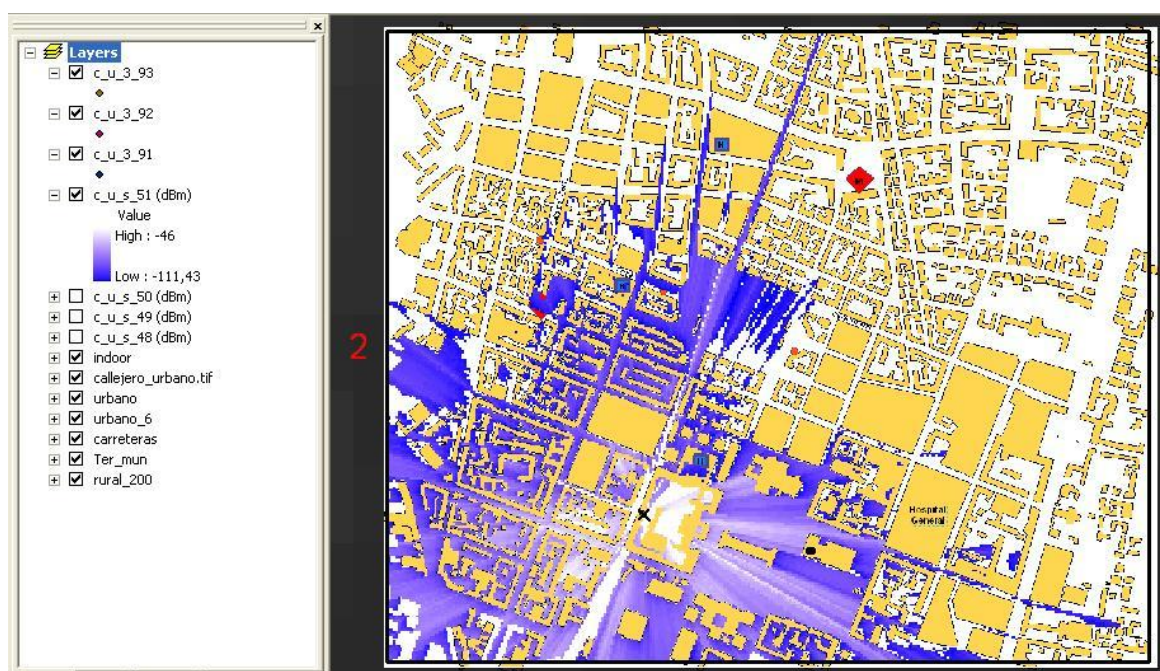


Figura 9.172. Cobertura de segundo sector (120°) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni





**Figura 9.173. Cobertura de tercer sector (240°) de cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



**Figura 9.174. Cobertura total proporcionada por cuarto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



Emplazamiento 5



Figura 9.175. Cobertura de primer sector (0°) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni

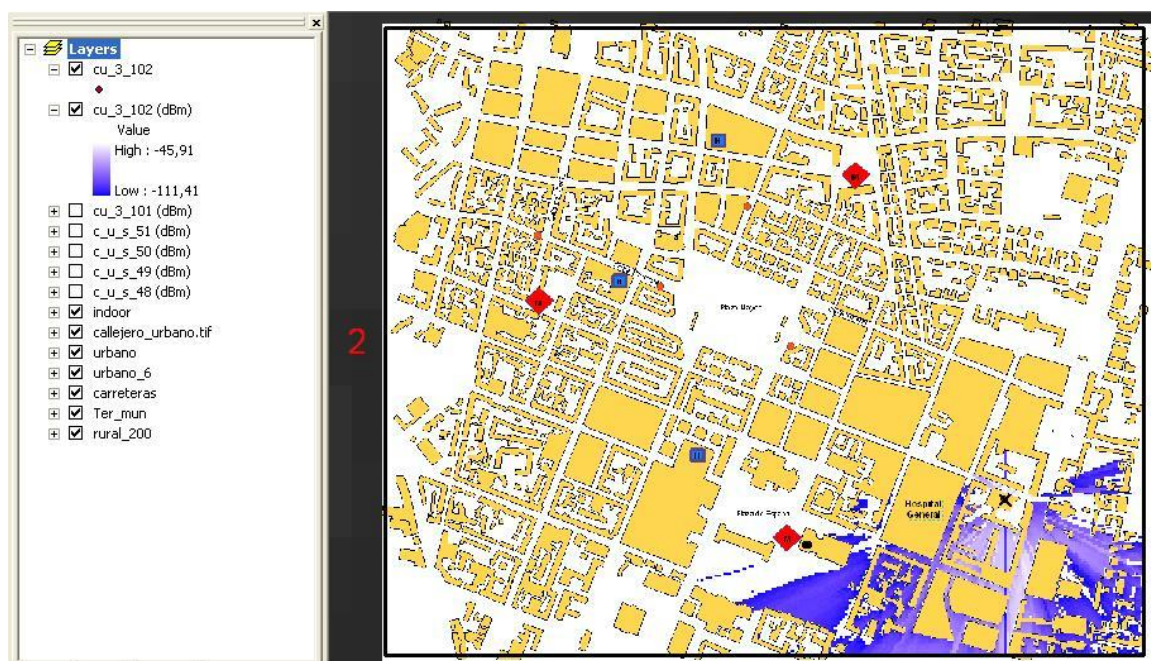
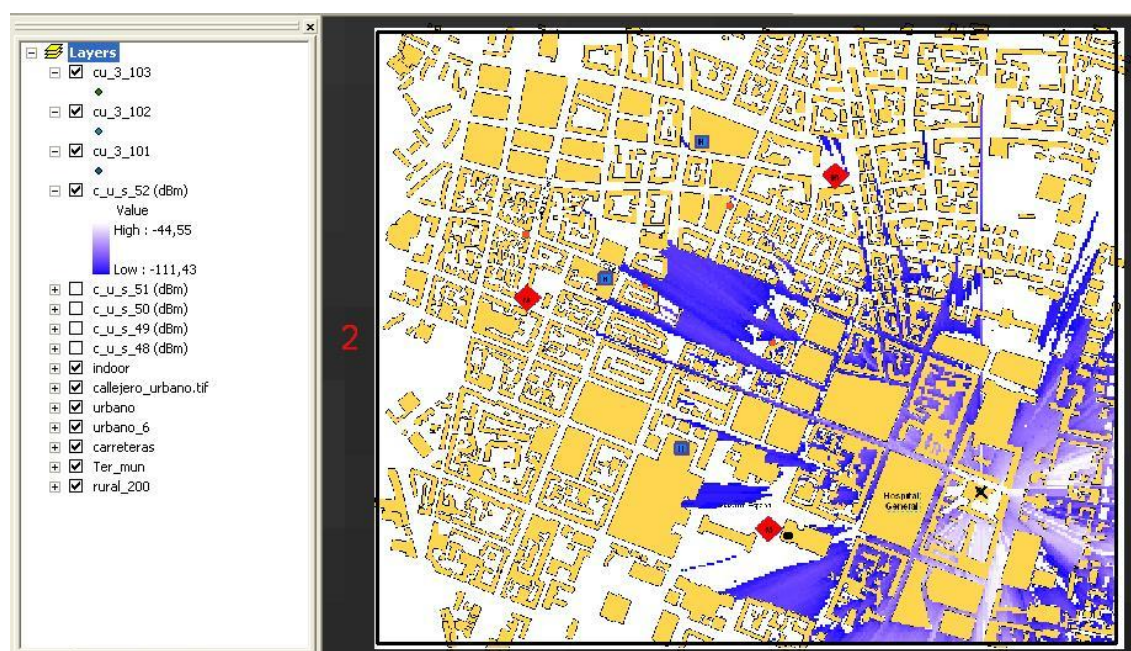


Figura 9.176. Cobertura de segundo sector (120°) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni



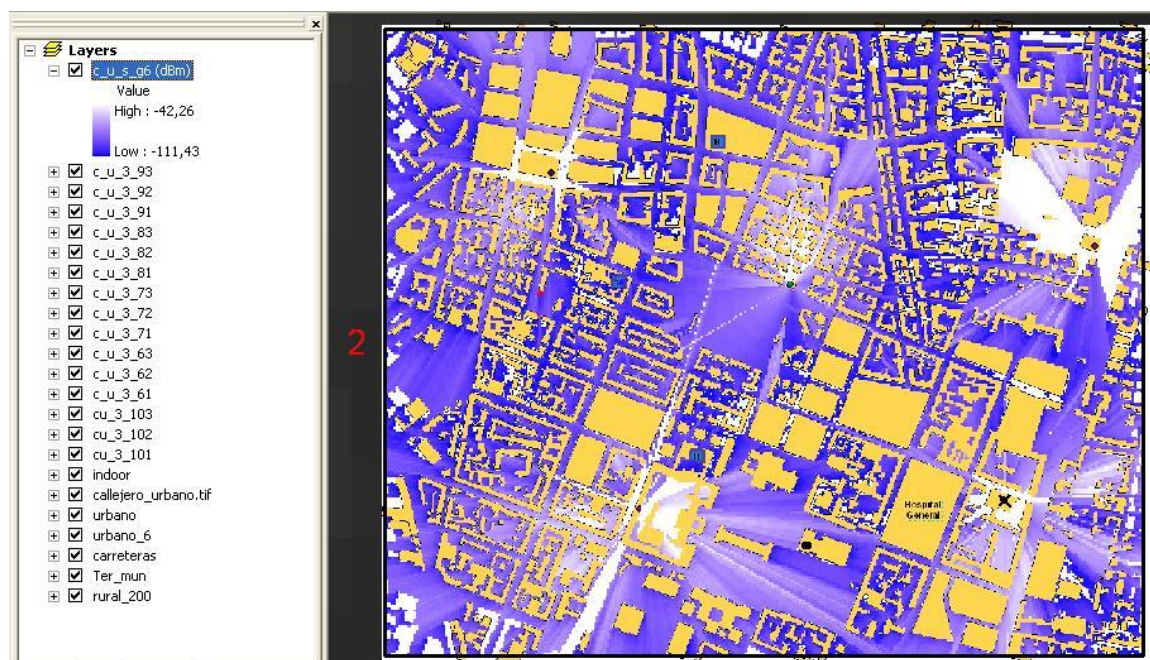


**Figura 9.177. Cobertura de tercer sector (240°) de quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



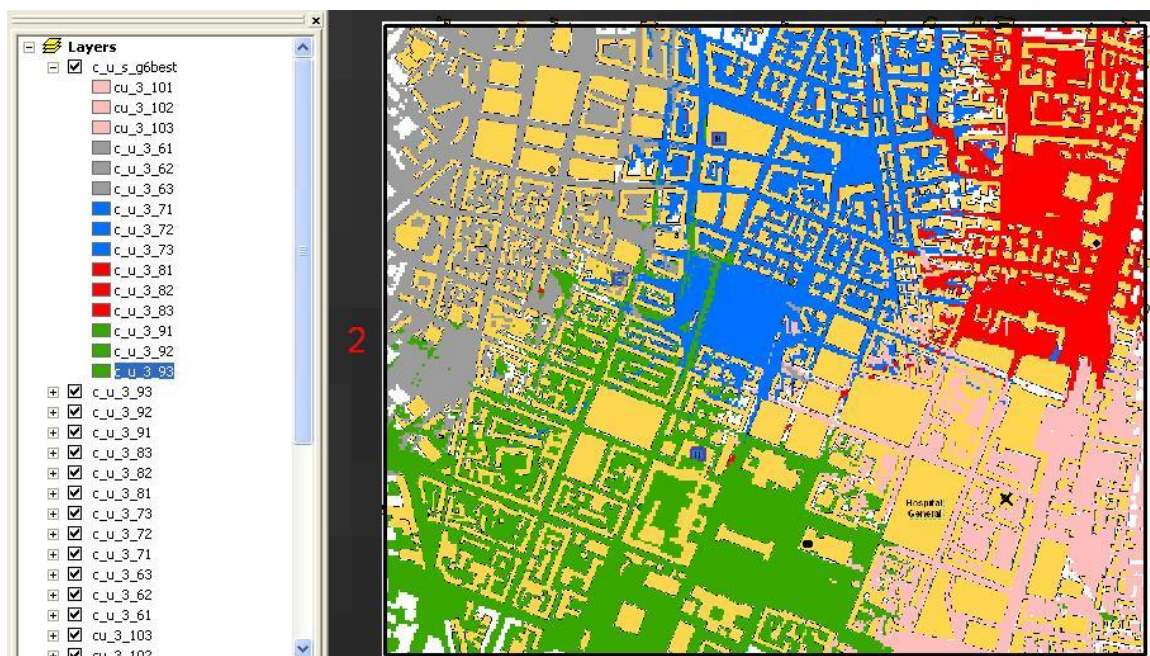
**Figura 9.178. Cobertura total proporcionada por quinto emplazamiento para caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**





**Figura 9.179. Cobertura total proporcionada por el sistema correspondiente al caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**

La zona de servicio queda también cubierta plenamente en este caso. En la Figura 9.180 tenemos el mapa de mejor servidor.



**Figura 9.180. Mapa de mejor servidor en el sistema correspondiente al caso 3 en entorno urbano, con Har-Xia-Bertoni**



En el mapa de la Figura 9.180 se aprecia que las coberturas generadas son muy similares a las obtenidas con el modelo COST-231. Únicamente el eNodo 5 abarca aquí una cobertura ligeramente mayor en detrimento de un menor rango de servicio de los eNodos 2 y 3, comparándolo con el apartado anterior.

## 9.2. ENTORNO RURAL

Para la zona rural se presentó un resumen del número de estaciones base necesarias en cada situación a través de la Tabla 7.38. , En esta observábamos que para los tres casos elegidos el número de eNodos B necesarios era el mismo, uno.

Además, este número coincidía con el número de eNodos B obtenido a través del dimensionamiento efectuado por pérdidas máximas, también uno. De este modo, realizaremos un único despliegue que será válido para las tres configuraciones estipuladas.

En este entorno haremos uso únicamente del modelo de propagación comentado anteriormente, UIT R-526.

Al tener un único emplazamiento, emplearemos un eNodo B cuyo diagrama de radiación es omnidireccional, en lugar del sectorial del que hicimos uso en el área urbana. La localización de este viene dada por las coordenadas de la Tabla 9.11.

COORDENADAS		
	X (m)	Y (m)
eNodo B 1	3691306	5345103

**Tabla 9.11. Coordenadas de la ubicación de los eNodos B para el entorno rural**

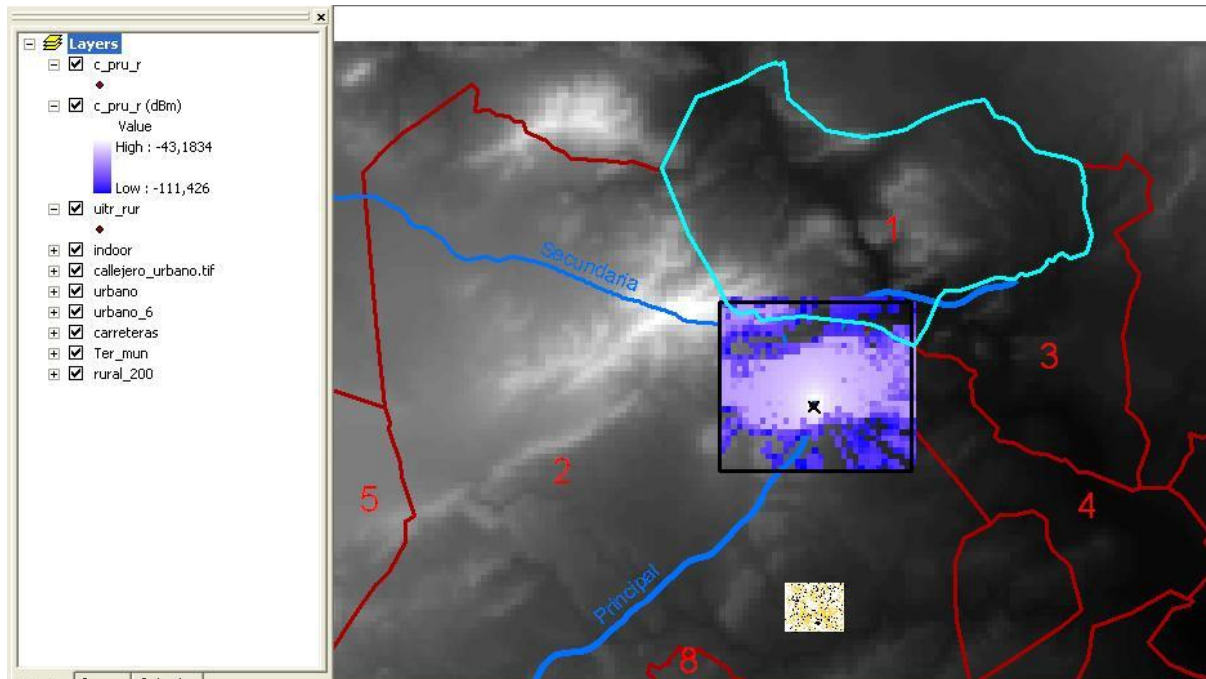
Por otro lado, la configuración realizada en RadioGIS para este único emplazamiento es la que aparece en la Tabla 9.12.

	Elev ( $\varphi$ )	H <sub>TX</sub> (m)	PIRE (dBm)	G <sub>r</sub> (dB)	L <sub>r</sub> (dB)	S (dBm)
eNodo B	0°	40	20	17	3	-111,435

**Tabla 9.12. Configuración para antena omnidireccional de entorno rural en RadioGIS, usando el modelo UIT R-526**

### 9.2.1. UBICACIÓN BASADA EN USO DE MODELO DE PROPAGACIÓN UIT R-526

La cobertura presentada por el único emplazamiento requerido para este análisis aparece en la Figura 9.181.



**Figura 9.181. Cobertura total proporcionada por el sistema en entorno rural, con UIT R-526**

En esta última figura se observa que el área rural, marcada con el recuadro negro, es cubierta por el eNodo B desplegado. A diferencia de los casos del entorno urbano, aquí si hemos empleado los 20 dBm estipulados en el balance de enlace más desfavorable, ya que al ser una antena omnidireccional no nos tendremos que preocupar por los solapamientos. Además, el ángulo de elevación lo fijamos en cero grados, para también abarcar la máxima superficie posible.

## 10. CONCLUSIONES

El crecimiento cualitativo que se está produciendo en las redes de nueva generación trata de responder a la exigente demanda por parte de los usuarios. El ingente aumento del tráfico de vídeo obliga a que las continuas mejoras se centren principalmente en la tasa de datos y en la latencia, tratando de obtener velocidades de centenares de megabits y tiempos de retardos inferiores a la decena de milisegundos.

Hemos podido realizar adecuadamente la planificación de la red LTE para satisfacer estos requisitos en dos zonas de la Región de Murcia, considerando como proveedor de servicio a Vodafone. La nueva banda liberada de 800 MHz la asignamos al entorno rural, mientras que los 20 MHz de ancho de banda que posee Vodafone en la banda de 1800 MHz son usados en el área urbana.

Teniendo en cuenta que el consumo de internet móvil está siendo cada vez mayor, hemos llevado a cabo los distintos dimensionamientos estimando un consumo medio mensual por usuario de 7 GB. Aunque hoy en día pueda ser una cantidad algo elevada para tomarla como referencia, el constante crecimiento en número de usuarios hará que las tarifas de banda ancha móvil sean más accesibles para el consumidor y, por tanto, la oferta será cuantitativamente superior.

Por otro lado, se ha podido hacer una comparación de las tasas de bits entre las distintas modulaciones presentes en LTE, QPSK, 16-QAM y 64-QAM, y aplicando también la técnica MIMO a distintos anchos de banda. Con esto se ha apreciado que, al tener una modulación de menor nivel, la capacidad del eNodo B también es menor y, por tanto, es necesario un mayor número de emplazamientos para dar servicio al mismo número de usuarios. Además, esta capacidad también se ve influida por dos conceptos que hemos tenido en cuenta, como son el *overhead* y el CQI. Estos nos limitarán la cantidad de información que podremos estar intercambiando en la comunicación.

Posteriormente, se ha realizado una comparativa del número de eNodos B que se obtienen con los tres tipos de métodos que se han presentado. Los resultados en el entorno urbano muestran que el análisis basado en las pérdidas máximas compensables en el enlace da como resultado un número mínimo de estaciones base, mientras que si nos basamos en el tráfico del usuario, el estudio según el volumen de tráfico ofrecido es más desfavorable que el que se enfoca en la tasa de datos ofrecida. Con esto concluimos que, como el despliegue dependería del caso que determinase mayor número de eNodos B, el número de emplazamientos vendría entonces definido por el dimensionamiento según volumen de tráfico ofrecido. En el área rural, los tres análisis dan como resultado un único eNodo B para casi todos los casos, por lo que la elección del método empleado no varía el resultado.

Finalmente, a través del software de información geográfica RadioGIS hemos conseguido fijar la localización de los distintos emplazamientos con el fin de proporcionar plena cobertura tanto en el entorno rural como en el urbano. En esta segunda localización la variación en el terreno es mucho mayor que en el primero. Debido a esto y para que los resultados sean más fiables, en el programa se hace uso de un perfil urbano muy similar al de la ciudad de Murcia como es el de Múnich.



### *Apartado 9 – Ubicación óptima de eNodos B.*

Aun con las buenas prestaciones que presenta LTE, la tecnología móvil sigue un desarrollo continuo, y es por eso que las mejoras que se van originando dan paso al nuevo estándar denominado LTE-Advanced o 4G+. La mejora superlativa que proporciona LTE-Advanced es denominada *carrier aggregation* y consiste en la posibilidad de hacer un uso de múltiples bandas de frecuencia de manera simultánea, pudiendo así combinar los anchos de banda y obtener mayores velocidades de bajada. Además, también se trabaja en la siguiente generación, denominada 5G, donde el punto central será el llamado Internet de las Cosas, en el que no existe comunicación tan sólo entre personas sino también entre máquinas.

## **11. BIBLIOGRAFÍA**

[1] LTE for UMTS - OFDM and SC-FDMA Based Radio Access, Harri Holma, Antti Toskala, 2009, John Wiley & Sons.

[2] LTE Ecosystem update report, Global mobile Suppliers Association (GSA), 2015.  
Web de GSA: [http://www.gsacom.com/news/gsa\\_427.php](http://www.gsacom.com/news/gsa_427.php)

[3] Mobile HD voice: Global Update report, GSM/3G Market/Technology update, Global mobile Suppliers Association (GSA), 2015.  
Web de GSA: [http://www.gsacom.com/downloads/pdf/GSA\\_mobile\\_hd\\_voice\\_230415.php4](http://www.gsacom.com/downloads/pdf/GSA_mobile_hd_voice_230415.php4)

[4] LTE user devices Ecosystem, Global mobile Suppliers Association (GSA), 2015. Web de GSA: [http://www.gsacom.com/downloads/charts/pdf/GSA\\_LTE\\_devices\\_form\\_factors.php](http://www.gsacom.com/downloads/charts/pdf/GSA_LTE_devices_form_factors.php)

[5] 3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development and Test Challenges, Agilent, 2009.

[6]<http://electronicdesign.com/test-amp-measurement/cost-wireless-test-must-fall-protect-margins>

[7] LTE Global map, GSA, 2015.  
Web de GSA: [http://www.gsacom.com/downloads/charts/pdf/LTE\\_global\\_map.php](http://www.gsacom.com/downloads/charts/pdf/LTE_global_map.php)

[8] ETSI 3GPP Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), User Equipment (UE) radio access capabilities, version 8.2.0 Release 8, 2008

[9] ETSI 3GPP Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Overall Description, version 10.4.0 Release 10, 2011

[10] Mobile Broadband Including Wimax and LTE, Mustafa Ergen, Springer Science+Business Media, LLC 2009.

[11] LTE, The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker, 2011, John Wiley & Sons

[12] ETSI 3GPP Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical layer procedures, version 8.8.0 Release 8, 2009

[13] Spain Digital, Future in focus. Hechos clave del Mercado digital español, comScore, 2013.  
Web: <http://www.digital-nature.com/uploads/documentos/2013-Spain-Digital-Future-in-Focus.pdf>

[14][http://oficinavirtual.mityc.es/SETSI\\_RegConcesiones/default.aspx?codservicio=1800&servicio=Servicio+de+Comunicaciones+Electr%u00f3nicas+1800+Mhz&titular=&rn=true](http://oficinavirtual.mityc.es/SETSI_RegConcesiones/default.aspx?codservicio=1800&servicio=Servicio+de+Comunicaciones+Electr%u00f3nicas+1800+Mhz&titular=&rn=true)

- [15] <http://www.xataka.com/moviles/lte-en-espana-quien-cuando-y-por-que>
- [16] <http://www.xatakamovil.com/conectividad/operadores-aceleran-el-despliegue-de-4g-en-espana-asi-queda-el-mapa-de-cobertura-y-proximos-objetivos>
- [17] <http://www.televisiondigital.gob.es/DividendoDigital/Paginas/zamora-pionera4G-banda800.aspx>
- [18] <http://www.adslzone.net/2015/08/05/mapa-de-cobertura-4g-800-mhz-que-mejorara-tu-velocidad-en-interiores/>
- [19] <http://data.cnmc.es/datagraph/jsp/graph/mapa.jsp>
- [20] <http://www.vodafone.es/conocenos/es/vodafone-espana/mapa-de-cobertura/consulta-de-cobertura-movil/>
- [21] <http://www.movistar.es/particulares/coberturas/movil>
- [22] <http://4g.orange.es/cobertura/>
- [23] <http://www.verizonwireless.com/b2c/splash/datacalculatorPopup.jsp>
- [24] <http://www.vodafone.com.au/personal/wireless-internet/mobile-broadband/data-calculator>
- [25] Sistema de prueba R&S®TS8980 verifica los indicadores de calidad LTE CQI, PMI y RI, Rohde & Schwarz, 2011
- [26] <http://data.cnmc.es/datagraph/jsp/graph/grafico-cuota-mercado.jsp>
- [27] Encuesta sobre Equipamiento y Uso de Tecnologías de Información y Comunicación en los Hogares, Instituto Nacional de Estadística, 2014
- [28] Caracterización del canal móvil, Sistemas de Comunicaciones Móviles, Juan Pascual García, José María Molina García-Pardo y Leandro Juan Llácer, 2010
- [29] The Mobile Radio Propagation Channel, Second Edition, Parsons J. D., John Wiley & Sons, 2000